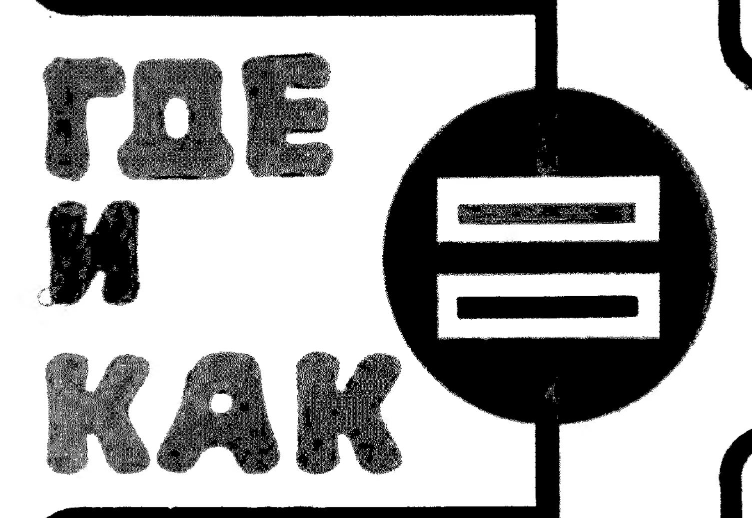
В. В. ЕРМУРАТСКИЙ



ПРИМЕНЯЮТСЯ КОНДЕНСАТОРЫ

Замеченные опечатки

Страница	Напечатано	Следует читать	По чьей вине
18	$10^{11} — 13^{11}$ В с	10^{11} — 10^{13} В с	Типографии
67	$\left(x_l \quad \frac{1}{\omega C} \quad \frac{1}{2\pi f C}\right)$	$\left(x_c \quad \frac{1}{\omega C} \quad \frac{1}{2\pi f C}\right)$	"
152	Типографская бумага № 1	Бумага для множительных аппаратов	Техредактора

31.264.6
Е 74

КНИГУ РЕЦЕНЗИРОВАЛИ И РЕКОМЕНДОВАЛИ К ИЗДАНИЮ
ДОКТОР ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК *В. И. МИШИН*
И КАНДИДАТЫ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК
М. А. НЕПОМНЯЩИЙ, В. М. ПОСТОЛАТИЙ, В. Л. ИВАНОВ

УДК 621.319.4

Ермуратский В. В. **Где и как применяются конденсаторы.** Кишинев: Штиинца, 1981, 152 с. с ил. (АН МССР, Отдел энергетической кибернетики).

В работе описаны устройства, в которых применяются конденсаторы. Кратко изложены цели, основные принципы создания и характеристики искусственных накопителей электрической энергии. Рассмотрено применение конденсаторов в емкостных накопителях энергии генераторов импульсов тока и напряжения, а также основные области их применения.

Приводятся сведения об использовании конденсаторов как элемента с частотно-зависимым реактивным сопротивлением для фильтрующих, фазовращающих цепей слабо- и сильноточных электронных и электротехнических устройств, а также о специфических применениях конденсаторов — в качестве нагревателя диэлектрических материалов, микрофона и др.

Книга адресуется широкому кругу читателей, знакомых с основами физики, электротехники и электроники.

Ermuratsky V. V. **Where and how capacitors are used.** Kishinev. Shtiintsa, 1981, 152 p. with illustrations (AS MSSR, Department of Energetical Cybernetics).

The work describes devices in which capacitors are used. Purposes, main principles of creation and specifications of the man-made accumulators of electric energy are given in short. Capacitors application in capacitance accumulators of energy of current and voltage pulse generators as well as the main fields of their use are considered.

Information about the use of capacitors as an element having reactive impedance dependent on the operating frequency for the filtering, phase-inverting circuits of carrying small and heavy currents electronic and electrotechnical devices is given. Capacitors specific application as heaters of dielectric materials, as microphones and others are also elucidated.

The book is addressed to a wide range of readers acquainted with the fundamentals of physics, electrotechnics and electronics.

Е $\frac{20401-172}{М755(12)-81}$ 183.81.1704010000

ПРЕДИСЛОВИЕ

Электрический конденсатор сосредоточенной емкости — это устройство, состоящее из проводящих электрический ток обкладок и диэлектрического (изолирующего) материала между ними.

Изобретенный практически случайно в 1745 г. конденсатор только с развитием электротехники переменного тока (электроэнергетики и радиотехники) получил широкое техническое применение. Теперь трудно назвать область деятельности человека, где бы не использовалось электричество, а вместе с ним и конденсатор — один из основных и интересных элементов электрических цепей.

В последние годы в связи с уменьшением запасов ископаемого топлива возрастает роль конденсаторов в электроэнергетике, где они обеспечивают экономию электроэнергии. Технические устройства, в которых применяются конденсаторы, весьма миогообразны. Однако функции конденсаторов в них примерно одинаковы. Кратко их можно сформулировать так: конденсаторы используются в устройствах импульсной техники в качестве накопителей электрической энергии, в технике синусоидальных токов — как реактивные элементы, оказывающие сопротивление (зависящее от частоты) переменному току практически без потерь энергии. Суммируя большинство применений конденсаторов, можно сказать, что они используются в энергетических и в информационных устройствах.

Многообразие устройств и условий использования конденсаторов обусловливает широкую гамму этих элементов.

Имеется большое количество конструкций конденсаторов, а их выпуск только в нашей стране достигает миллиардов штук в год. И несмотря на это, потребность в них все увеличивается. Появление новых конструкций конденсаторов связано не только с применением новых материалов, но и с новыми принципами накопления электрической энергии.

Цель предлагаемой книги — дать представление о назначении, функциях различных устройств, в которых применяются конденсаторы, а также о роли конденсаторов в этих устройствах.

В основу структуры книги положены функциональные особенности применения конденсаторов, сведения о которых, надеемся, упростят ориентирование читателя в области использования конденсаторов.

ГЛАВА I

КОНДЕНСАТОРЫ — НАКОПИТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

1. Какие бывают накопители энергии и для чего они необходимы*

Вся деятельность человека основана на использовании энергии — особого вида материи, с помощью которого происходит трансформация веществ, осуществляется движение, передается и преобразуется информация.

Основное количество энергии человечество получает от ее природных накопителей: ископаемого химического и ядерного горючего, гидро- и атмосферы. Кроме естественных (природных) накопителей энергии известны и используются искусственные, создаваемые людьми. Такие накопители не обладают энергией, они должны быть ею заряжены путем преобразования энергии природных накопителей.

Искусственные накопители энергии служат двум основным целям — относительно длительному накоплению, сохранению энергии и затем сравнительно медленному ее использованию, а также быстрому накоплению энергии и еще более быстрому ее расходованию. Примерами накопителей, с помощью которых достигается первая цель, могут служить маховики, накапливающие механическую энергию, химические вещества, электрохимические накопители, накопители тепловой энергии и др. Вторая цель достигается в основном с помощью накопителей электрической энергии.

Искусственные накопители энергии впервые получили применение в лаборатории ученых. Так, в качестве накопителя электрической энергии с момента изобретения (1745 г.) и по настоящее время широко используется конденсатор. Энергия в нем накапливается в электрическом поле. С развитием техники, использующей яв-

* Более подробно этот вопрос рассмотрен в книге Н. В. Гулиа «Накопители энергии». М.: Наука, 1980. 151 с.

ление сверхпроводимости, реальной стала возможность создания индуктивных накопителей большой энергоемкости, в которых энергия накапливается в магнитном поле.

Емкостные накопители энергии, первоначально использовавшиеся для исследовательских целей (с их помощью получают мощные импульсы тока и напряжения), затем стали применяться в технологических установках и в установках для испытаний материалов и др.

В связи с ростом энергопотребления, неравномерностью суточного распределения нагрузок и увеличением их пиков появилась потребность применения накопителей в электроэнергетике. У нас в стране и за рубежом получают широкое распространение гидроаккумулирующие станции. Накопителем энергии в них служит вода расположенного на возвышенности водохранилища. В ночное время, когда в энергосистеме имеется избыток энергии, воду с помощью мощных электронасосов закачивают в водохранилище. При пиках нагрузки воду из водохранилища пропускают через те же агрегаты, которые работают уже в режиме гидротурбин, а электродвигатели — в режиме генераторов.

Грандиозен проект покрытия пиковой нагрузки в энергосистеме с помощью индуктивного накопителя, сообщения о котором появились в печати. Сверхпроводящая тороидальная (в виде бублика) катушка располагается под землей. Диаметр сечения катушки более 100 м. Расчетное значение накопленной энергии около $4 \cdot 10^{13}$ Дж, или $1{,}1 \cdot 10^{7}$ кВт·ч. Этой энергии достаточно, чтобы в течение нескольких часов отдавать ее в энергосистему при мощности в тысячи мегаватт.

Разумеется, указанные накопители — не единственная возможность покрытия пиковых нагрузок. Созданы специальные газотурбинные или парогазовые установки, которые при таких пиках включаются в работу и вырабатывают дополнительную электроэнергию.

Решение отмеченной проблемы имеет очень большое значение для экономичного расходования топлива и ресурса основного оборудования тепловых электростанций, так как при переменной нагрузке падает их КПД и сильно изнашиваются котлы и турбины.

С целью использования энергии Солнца в последние годы ведутся интенсивные разработки накопителей теп-

ловой энергии, позволяющих экономить природное топливо.

Однако это пока единичные попытки создания и применения аккумуляторов больших количеств энергии. Наиболее отработана техника накопления электрической энергии с помощью конденсаторов.

2. Энергоемкость и КПД емкостных накопителей

В емкостных накопителях энергия накапливается в электрических конденсаторах. Все виды накопителей энергии характеризуются определенными показателями, позволяющими их сопоставлять и определять область рационального применения каждого из них.

Основные технические показатели различных накопителей энергии приведены в табл. 1. Кроме них важнейшими являются экономические характеристики — стоимость накопителя и выработки одного импульса, надежность накопителя.

Затраты на создание и эксплуатацию мощных и энергоемких накопителей, используемых в исследовательских целях, очень велики (десятки и сотни миллио-

Таблица 1

Технические показатели накопителей энергии

Накопитель энергии	Удельная объемная энергия, кДж/м³	Удельный ток короткого замыкания, кА/м³	Удельная мощность в импульсе, кВ·А/м³	Максимальная энергия единичного элемента накопителя, Дж
Механический (маховик)	10^5—10^7	—	—	—
Электромеханический	10^4—10^5	3—10	$(3-10)\cdot 10^5$	—
Химический	$(1-20)\cdot 10^7$	—	—	—
Электрохимический (химические источники тока)	$(1-5)\cdot 10^5$	$(0,3-1)\cdot 10^3$	$(0,3-1)\cdot 10^3$	$2\cdot 10^7$
Взрывчатые вещества	10^6—10^{10}	—	—	—
Индуктивный	$(1-4)\cdot 10^4$	1—10	$(0,1-1)\cdot 10^6$	10^{13}
Емкостный	50—500	10^4	$(1-5)\cdot 10^8$	10^4

нов рублей), поэтому при их разработке комплексно учитываются все отмеченные выше показатели. Технико-экономическая оптимизация накопителей производится и в других случаях их применения.

Запасаемая в индуктивных и емкостных накопителях энергия определяется похожими друг на друга выражениями

$$W_L = \frac{LI^2}{2} \text{ и } W_c = \frac{CU^2}{2},$$

где L — индуктивность, I — ток, C — емкость, U — напряжение.

В емкостных накопителях энергии используются специальные импульсные конденсаторы, для которых одной из важнейших характеристик, служащих для сопоставления различных конструкций, является объемная плотность энергии или удельная объемная энергия, кДж/м³:

$$w = \frac{W}{V}.$$

Для получения предельно возможных удельных энергий в импульсных конденсаторах используются диэлектрики при экстремальных значениях напряженности электрического поля, достигающих 100—150 МВ/м, т. е. близких к их электрической прочности.

Другой путь повышения энергоемкости конденсаторов заключается в использовании диэлектриков с большой диэлектрической проницаемостью (при этом растет емкость конденсатора).

Наибольший эффект в повышении удельной энергоемкости конденсаторов достигается при сочетании этих двух путей. Так, недавно был создан емкостный накопитель на миллионы вольт, у которого в качестве диэлектрика используется деионизированная вода, обладающая высокой электрической прочностью и сопротивлением изоляции. Относительная диэлектрическая проницаемость воды около 80, что более чем в 20 раз превышает проницаемость большинства диэлектриков, применяемых в силовых конденсаторах.

Абсолютное значение накопленной энергии в одном, даже самом крупногабаритном, конденсаторе сравнительно невелико — десятки тысяч джоулей, тогда как в ряде случаев использования конденсаторов требуемая

энергия разрядов составляет сотни миллионов джоулей и больше. Для получения таких энергий конденсаторы объединяются в батареи путем соединения единичных конденсаторов по соответствующей схеме. Однако удельная энергия как одиночного конденсатора, так и тем более батареи конденсаторов неизмеримо меньше, чем в других накопителях энергии (см. табл. 1).

В чем же тогда преимущество конденсатора как накопителя электрической энергии? Ответ получим при рассмотрении, каким образом используется накопленная в конденсаторе энергия. Очевидно, что обычные конденсаторы из-за малой энергоемкости не пригодны даже для питания лампочки карманного фонаря (см. табл. 1). Так, энергии конденсатора в 10^4 Дж, имеющего массу около 100 кг, хватило бы на питание лампочки карманного фонаря мощностью в 1 Вт на время, чуть большее 15 минут.

Емкостные накопители энергии целесообразно использовать для получения предельно больших по амплитуде и импульсной мощности токов малой длительности.

Действительно, среднюю мощность разрядного импульса тока можно определить как $P = \frac{W}{t_р}$, где $t_р$ — время разряда. Отсюда следует, что, уменьшая время разряда, можно получать экстремально большую мощность разрядного импульса. Естественно, что это время из-за наличия индуктивности и активного сопротивления как самого конденсатора, так и проводов, подводящих к нагрузке ток, не может быть меньше некоторого минимального значения, что обусловливает ограничение значения тока короткого замыкания и мощности импульса (см. табл. 1).

Из приведенной формулы для энергии емкостного накопителя следует, что ее значение не зависит от полярности напряжения, поскольку в нее входит квадрат этой величины. Физически это означает, что работа, которую можно выполнить за счет накопленной в конденсаторе энергии, будет одна и та же независимо от полярности напряжения на его зажимах.

Для накопления энергии от ее первичного источника к обкладкам должно быть передано определенное количество зарядов, т. е. конденсатор необходимо за-

рядить. Длительность зарядки конденсатора определяется режимом (характером и интенсивностью) зарядного этапа. Наиболее просто конденсатор можно зарядить от источника постоянного напряжения, подключив его через резистор. Ток зарядки уменьшается во времени по закону $i = \frac{U}{R} e^{-t/RC}$. Напряжение на конденсаторе растет во времени также по экспоненциальному закону $u = U(1 - e^{-t/RC})$ и через интервал времени $t = 3RC$ становится примерно равным напряжению источника питания. Недостаток такого способа зарядки конденсатора заключается в больших потерях энергии в зарядном резисторе, не зависящих от его сопротивления и равных энергии заряженного конденсатора, т. е. коэффициент полезного действия зарядки конденсатора таким способом равен 50%. Следовательно, этот способ зарядки нецелесообразно использовать при большой частоте повторения циклов, так как с ростом частоты сильно возрастает мощность потерь энергии в зарядном резисторе $\left(\frac{CU^2 f}{2}\right.$, где f — частота напряжения на конденсаторе$\left.\right)$. Этот способ зарядки конденсаторов применяется в основном в маломощных электронных устройствах и при низких частотах.

Зарядка конденсатора может осуществляться постоянным (неизменным во времени) током от специальных источников тока. При зарядке постоянным током напряжение на конденсаторе изменяется во времени по линейному закону, так как заряды накапливаются на обкладках с постоянной скоростью:

$$u = \frac{it}{C}.$$

Из этой формулы следует, например, что при токе силой 1 А конденсатор емкостью 1 мкФ $= 10^{-6}$ Ф зарядится до напряжения 10^3 В в течение времени

$$t = \frac{10^3 \cdot 10^{-6}}{1} = 10^{-3} \text{ с.}$$

Зарядку конденсатора постоянным током производят не столько для ускорения этого процесса, сколько для уменьшения потерь энергии.

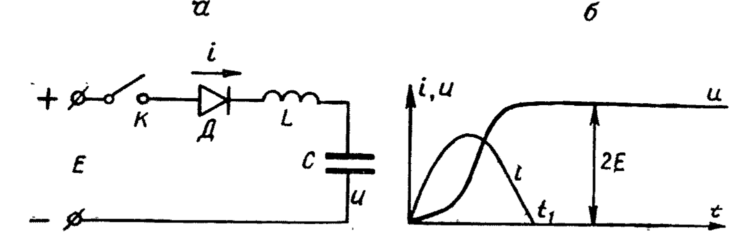


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема для колебательной зарядки конденсатора (*а*), форма мгновенного тока (*i*) и напряжения (*u*) конденсатора (*б*)

Другим распространенным способом является колебательная зарядка конденсатора от источника напряжения через катушку индуктивности L (рис. 1, *а*). Диод *Д* в цепи заряда, пропускающий ток только в одном направлении, служит для предотвращения разряда конденсатора на источник E. При включении ключа K, которым может быть тиратрон, тиристор, транзистор, электронная лампа (в данных случаях роль диода *Д* выполняет этот элемент) или другой управляемый коммутатор, например разрядник, в зарядной цепи протекает ток, имеющий форму, близкую к полуволне синусоиды с периодом, примерно равным $T=2\pi\sqrt{LC}$. Напряжение на конденсаторе C будет изменяться по закону, близкому к $u=E\left(1-\cos\frac{2\pi}{T}t\right)$ (рис. 1, *б*). В момент времени $t_1=\frac{T}{2}$, когда ток в цепи зарядки упадет до нуля, диод *Д* закроется.

Особенность данного способа зарядки конденсатора в том, что напряжение, до которого заряжается конденсатор, достигает почти двойного напряжения источника питания, т. е. происходит удвоение напряжения. Коэффициент полезного действия колебательного режима зарядки конденсатора, который в основном определяется добротностью катушки L $\left(Q=\frac{2\pi L}{T\cdot r}\right.$, где r — активное сопротивление катушки$\left.\right)$, достаточно высок — 90% и выше, т. е. при этом способе зарядки потери энергии значительно ниже, чем при зарядке конденсатора через активное сопротивление.

Для зарядки конденсаторов емкостных накопителей больших количеств энергии применяются ионные, полупроводниковые и другие преобразователи с более сложными законами управления, позволяющие повысить КПД устройства зарядки и точность получения необходимого уровня напряжения на накопителе.

Коэффициент полезного действия емкостного накопителя можно определить как отношение энергии, выделенной в нагрузке при его разряде, к сумме этой энергии и энергии, потерянной при зарядке и разряде. Эти потери в основном в виде тепла имеются в зарядном устройстве на этапе зарядки, в разрядной цепи при разряде и в конденсаторах на этих этапах и при выдержке их под напряжением.

Потери энергии снижают КПД накопителя и, кроме этого, вызывают ограничения по частоте циклов зарядки и разряда из-за нагрева его элементов. КПД импульсных конденсаторов определяется отношением накапливаемой энергии к сумме этой энергии и тепловыделения в нем. Для современных видов импульсных конденсаторов он высок — 99% и более, что достигается применением диэлектриков с малыми потерями и специальных конструкций секций и выводов, обеспечивающих малое омическое сопротивление токоведущих частей.

3. Конденсаторы в источниках импульсов тока

Для получения импульсов электрической мощности с помощью конденсаторов их предварительно заряжают, а затем каким-либо коммутирующим устройством разряжают на нагрузку, носящую обычно активно-индуктивный характер (рис. 2, *а, б*).

Амплитуда импульса разрядного тока (I_m) зависит от результирующих индуктивности и активного сопротивления разрядной цепи, образуемых нагрузкой ($L_н$, $r_н$), конденсатором, соединительными проводниками и коммутатором ($L_э$, $r_э$ на рис. 2, *б*).

В зависимости от соотношения между волновым сопротивлением контура $\rho=\sqrt{\frac{L_э+L_н}{C}}$ и его активным

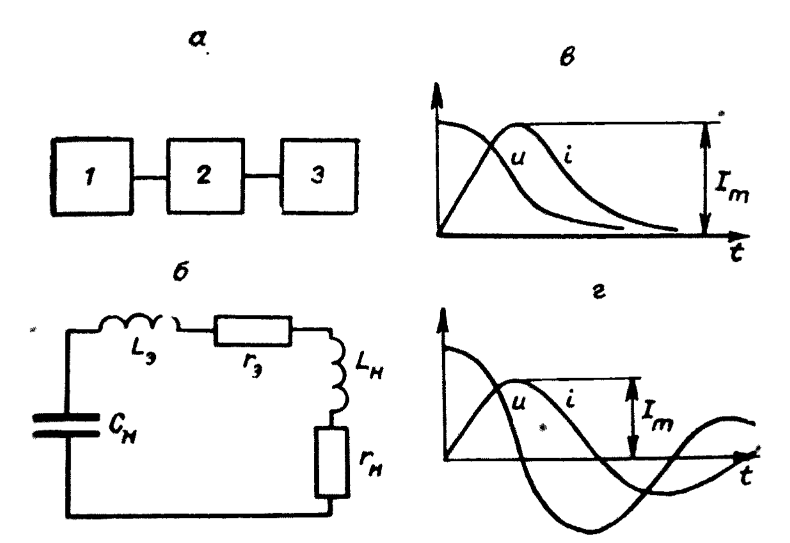


Рис. 2. Блок-схема одноконтурного генератора импульсов тока (*а*): *1* — зарядное устройство; *2* — накопительный конденсатор; *3* — коммутирующий элемент. Упрощенная электрическая схема разрядной цепи (*б*). Форма тока и напряжения конденсатора при апериодическом (*в*) и колебательном (*г*) характерах разряда

сопротивлением $r=r_э+r_н$ импульс разрядного тока может быть разным. При $r>2\rho$ будет апериодический разряд, при котором ток имеет форму униполярного импульса, а напряжение и мгновенная энергия конденсатора монотонно убывают во времени (рис. 2, *в*).

Если активное сопротивление контура $r<2\rho$, то возникает колебательный разряд конденсатора, при котором ток и напряжение имеют вид затухающих колебаний, по форме близких к синусоиде с убывающей во времени амплитудой (рис. 2, *г*). При $r \ll 2\rho$ амплитуда разрядного тока (его максимальное значение I_m на рис. 2, *г*) определяется волновым сопротивлением контура и напряжением U на конденсаторе $I_m=\frac{U}{\rho}$.

При апериодическом разряде амплитуда импульса тока I_m (рис. 2, *в*) тоже тем больше, чем меньше индуктивность и активное сопротивление цепи и выше напряжения на конденсаторах. Поэтому для получения токов большой силы в генераторах импульсов тока

Таблица 2

Параметры импульсных установок с емкостными накопителями

Тип и назначение установки	Зарядное напряжение, кВ	Запасаемая энергия, Дж	Амплитуда тока в нагрузке, А	Период разрядного тока, мкс	Индуктивность, мкГн	
					собственная	общая
Батарея для быстрого сжатия плазмы (США)	60	$0{,}4\cdot10^6$	$3{,}4\cdot10^6$	24	—	68
Батарея для ядерных исследований (Великобритания)	40	10^6	$12\cdot10^6$	24	5,6	—
Батарея для экспериментов с ударными волнами (США)	20	$0{,}3\cdot10^6$	$7{,}1\cdot10^6$	—	3,0	—
Батарея «Зевс» (США)	20	$12\cdot10^6$	$40\cdot10^6$	200	2,0	—
Isar-I, вторая очередь (ФРГ)	40	$2{,}6\cdot10^6$	$22\cdot10^6$	40	—	—
Батарея для исследования сильноточного газового разряда (СССР)	50	$2{,}5\cdot10^6$	$12\cdot10^6$	42	6,4	22

стремятся снизить волновое сопротивление ρ (уменьшая, например, индуктивность контура), а также увеличить напряжение на конденсаторах.

От значения емкости и индуктивности контура зависят также длительность импульса тока при апериодическом характере разряда и период колебаний $T\approx\approx2\pi\sqrt{LC}$ при колебательном разряде.

Путем расчетов определяются предельно допустимые значения индуктивности, активного сопротивления контура и емкости конденсаторов, необходимые для получения в нагрузке импульса тока нужной амплитуды, длительности и формы.

Проблемы, возникающие при формировании экстремально больших импульсов тока, обусловлены трудностями получения малой индуктивности контура; обеспечения механической прочности конструкций при действии гигантских электродинамических сил, доходящих до десятков тысяч ньютон на 1 см длины проводников; создания надежных коммутирующих приборов на большие силы тока и высокие напряжения. Они

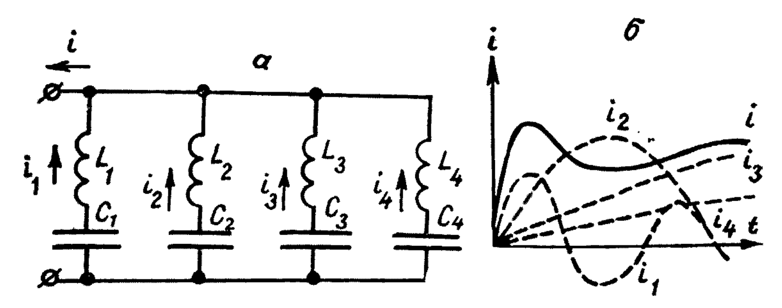


Рис. 3. Схема многоконтурного накопителя (*а*) и форма разрядных токов (*б*):

L_1—L_4 — дроссели; C_1—C_4 — конденсаторы ячеек накопителя

преодолеваются путем создания многоконтурных генераторов импульсов тока, у которых несколько емкостных накопителей с помощью синхронно работающих коммутаторов одновременно разряжаются на одну нагрузку.

Такой принцип, например, используется в установках предельно больших энергий с емкостными накопителями.

Представление о грандиозности параметров генераторов импульсов тока для различных целей дают показатели табл. 2.

Для получения импульсов тока большой силы на низкоомной нагрузке используется разряд конденсатора через согласующий понижающий трансформатор. В этом случае трансформатор должен быть специальной конструкции для хорошей индуктивной связи между первичной и вторичной обмотками, а также иметь высокую механическую прочность.

Часто от генераторов импульсов требуется получить токи, не только большие по амплитуде и скорости нарастания, но и импульсы специальной формы, отличающиеся от показанных на рис. 2. Это достигается с помощью различных многоконтурных генераторов.

На рис. 3, *а* показана схема, состоящая из четырех последовательных *LC*-цепочек, включенных параллельно, на рис. 3, *б* — форма мгновенного суммарного тока (*i*) и токов отдельных контуров (i_1, i_2, i_3, i_4) при их разряде на низкоомную нагрузку. Параметры контуров (*L* и *C*) влияют на амплитуды и длительность импуль-

сов тока, благодаря чему могут быть получены различные по форме, амплитуде и длительности импульсы тока. Токи с формой, которая подобна изображенной на рис. 3, *б*, часто необходимы для обеспечения форсирования какого-либо процесса вначале, а затем поддержания его на определенном уровне.

Генераторы мощных импульсов тока с емкостными накопителями широко применяются для испытаний высоковольтных выключателей, а также в различных технологических установках (см. пункт 5).

4. Конденсаторы в импульсных генераторах напряжения

Для различных целей создаются и используются электронные и электромеханические генераторы напряжения двух основных видов — незатухающих синусоидальных колебаний и напряжений специальной формы. Последние представляют собой низковольтные и высоковольтные генераторы импульсов разнообразной формы, а также затухающих синусоидальных колебаний.

Хотя принципиально генераторы импульсов напряжения могут быть созданы на основе индуктивных накопителей энергии, подавляющее их большинство основывается на применении емкостных накопителей. Примером использования индуктивного накопителя для получения импульса высокого напряжения с очень крутым фронтом могут служить системы зажигания автомобилей. В них постоянный ток, проходя в первичной обмотке катушки зажигания, образует магнитное поле, энергия которого после обрыва тока прерывателем (устройством, связанным механически с системой подачи газовой смеси в цилиндры) преобразуется в энергию искры высокого напряжения в свечах зажигания.

Принципы, лежащие в основе построения генераторов импульсов напряжения, по существу те же, что и генераторов импульсов тока. Действительно, при протекании импульса тока через сопротивление нагрузки на нем выделяется напряжение, значение и форма ко

торого определяются этим током и сопротивлением нагрузки.

Но если для генерирования импульсов тока конечной целью является либо нагрев, либо создание магнитного поля высокой интенсивности, либо создание разряда в газе или жидкости, т. е. нагрузка таких генераторов низкоомная, то обычное назначение генераторов импульсов напряжения — создание напряжений импульсной формы на высокоомной нагрузке, т. е. здесь конечный эффект достигается воздействием на объект электрического поля. Осуществляют эти функции, например, высоковольтные генераторы импульсов, применяемые в ускорителях заряженных частиц, в импульсных рентгеновских установках, в устройствах для испытания высоковольтного оборудования и др. Амплитуда импульсов напряжения таких генераторов достигает миллионов вольт.

Низковольтные генераторы импульсов напряжения специальной формы (прямоугольной, треугольной, пилообразной и т. д.) с емкостными накопителями и коммутаторами в виде электронных ламп и полупроводниковых приборов широко используются в измерительной, радиолокационной и другой электронной технике. Здесь главная цель — обеспечение на нагрузке импульсов фиксированной формы и параметров.

Длительность импульсов и частота их следования у высоковольтных генераторов напряжения обычно малы — соответственно от 10^{-10} до 10^{-3} с и не более десятков—сотен герц. Низковольтные же генераторы обеспечивают формирование импульсов с частотой следования от тысячных долей герца до сотен мегагерц. Это различие связано с ограничениями по мощности элементов генераторов импульсных напряжений, а также с другими причинами.

Для получения импульсов высокого напряжения в генераторах используются два основных принципа. Это разряд конденсатора, батареи конденсаторов или многоконтурного емкостного накопителя непосредственно на нагрузку, а также их разряд на нагрузку через повышающий трансформатор.

В ряде случаев необходимо получать относительно короткие, с большой скоростью нарастания фронта напряжения высоковольтные импульсы. Для этого ис-

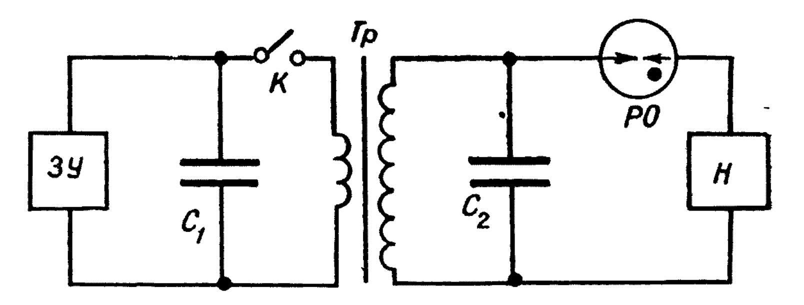


Рис. 4. Упрощенная схема генератора импульсов высокого напряжения с повышающим трансформатором (*Тр*), разрядником-обострителем (*РО*). *ЗУ* — зарядное устройство

пользуют обострение импульсов с помощью разрядников-обострителей (упрощенная схема такого генератора показана на рис. 4).

При включении коммутирующего элемента *К* на повышающий импульсный трансформатор *Тр* разряжается первичный емкостный накопитель C_1, заряжая вторичный емкостный накопитель C_2. По достижении напряжения на C_2 уровня, при котором срабатывает (пробивается) разрядник-обостритель *РО*, происходит разряд накопителя C_2 на нагрузку *Н*.

Благодаря малой индуктивности вторичного контура и малому времени срабатывания разрядника *РО* (порядка 10^{-9}—10^{-10} с) достигается очень большая скорость нарастания напряжения на нагрузке — до 10^{11}—13^{11} В/с.

В других случаях применения источников высоковольтных импульсов напряжения требуется большая скорость нарастания напряжения, но сам импульс должен быть достаточно длинным и иметь плоскую вершину. Такое требование, в частности, возникает при питании импульсных модуляторов радиолокационных и других импульсных передатчиков сверхвысоких частот на магнетронах и клистронах. Импульсное напряжение они получают от искусственных формирующих линий, являющихся многоконтурным накопителем (рис. 5).

От числа ячеек накопителя зависит длительность импульса напряжения, от емкости и индуктивности ячейки — волновое сопротивление накопителя и крутизна фронта импульса напряжения. Чтобы в накопи-

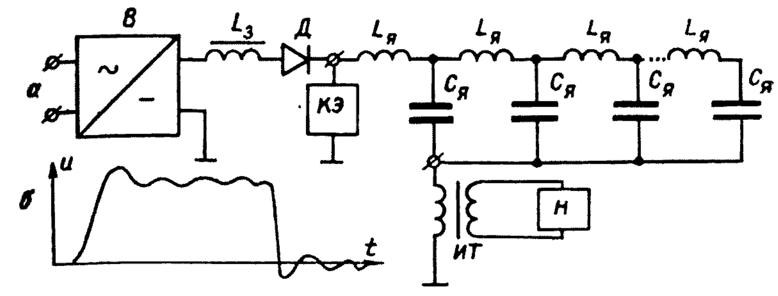


Рис. 5. Схема импульсного модулятора с емкостным многоконтурным накопителем (*а*) и форма импульса на нагрузке (*б*):

В — выпрямитель; $L_з$ — зарядный дроссель; *Д* — диод; *КЭ* — коммутирующий элемент; $L_я$ — дроссель; $C_я$ — конденсатор ячейки; *ИТ* — импульсный трансформатор; *Н* — нагрузка

теле не возникали отраженные волны, его волновое сопротивление должно быть согласовано с сопротивлением нагрузки. Это осуществляется с помощью импульсного трансформатора *ИТ*, который одновременно обеспечивает необходимую амплитуду импульса напряжения на нагрузке.

Второй принцип построения генераторов импульсов высокого напряжения поясним на примере схемы (рис. 6).

При зарядке конденсаторы накопителя C_1 соединены параллельно и заряжаются до одного и того же напряжения. При срабатывании пускового разрядника P_1 из-за паразитных емкостей на землю узлов соединения резисторов, разрядников и конденсаторов на-

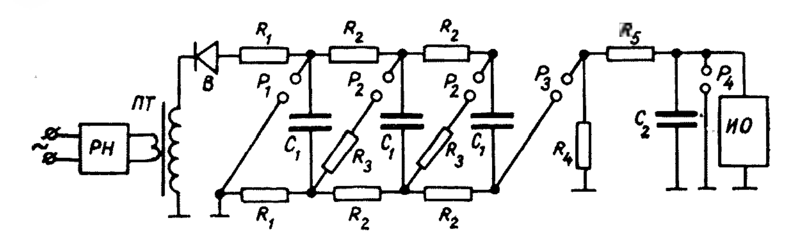


Рис. 6. Схема каскадного генератора импульсов высокого и сверхвысокого напряжения:

РН — регулятор напряжения; *ПТ* — повышающий трансформатор; *В* — выпрямительный диод; R_1, R_2 — резисторы зарядной цепи; R_3 — демпфирующие резисторы; P_1, P_2, P_3 — пусковой, промежуточный и отсекающий разрядники; C_1, C_2 — конденсаторы; *ИО* — испытуемый объект

пряжение на разрядниках P_2 повышается и они также пробиваются. Конденсаторы накопителя оказываются соединенными последовательно, благодаря чему схема получила название каскадного генератора импульсных напряжений. В таком генераторе конструктивно элементы расположены в виде изоляционной башни (или этажерки), так как при срабатывании разрядников элементы, удаленные от левой части схемы (см. рис. 6), оказываются под возрастающим потенциалом относительно земли.

Положительным свойством генератора импульсов этого типа является возможность получения предельных импульсных напряжений (до нескольких миллионов вольт) при относительно небольших напряжениях на конденсаторах (сотни тысяч вольт) путем набора соответствующего числа ячеек (каскадов).

Другое важное качество — это возможность регулирования длительности фронта импульса, спада его вершины и длительности самого импульса с помощью резисторов R_4, R_5, емкости C_2 и укорачивающего разрядника P_4 (см. рис. 6). Если в таком генераторе резисторы R_1, R_2 заменить реакторами (мощными высоковольтными катушками индуктивности), то его можно использовать при повышенных частотах повторения импульсов, так как потери энергии на этапе зарядки будут резко снижены по сравнению с резисторным вариантом.

Гораздо более многочисленной является группа генераторов импульсов низкого напряжения, также использующих емкостные накопители энергии. Однако несмотря на разнообразие схем генераторов, в них применяются основные принципы зарядки и разряда конденсатора, изложенные в пункте 2. Это зарядка (или разряд) через резисторы, зарядка (или разряд) через катушки индуктивности и зарядка (или разряд) постоянным током, получаемым от специальных преобразователей (см. пункт 6).

Большую группу среди них образуют генераторы релаксационных колебаний, в которых энергия источника питания преобразуется в энергию разрывных колебаний с помощью накопительного элемента (в данном случае конденсатора) и нелинейного управляемо-

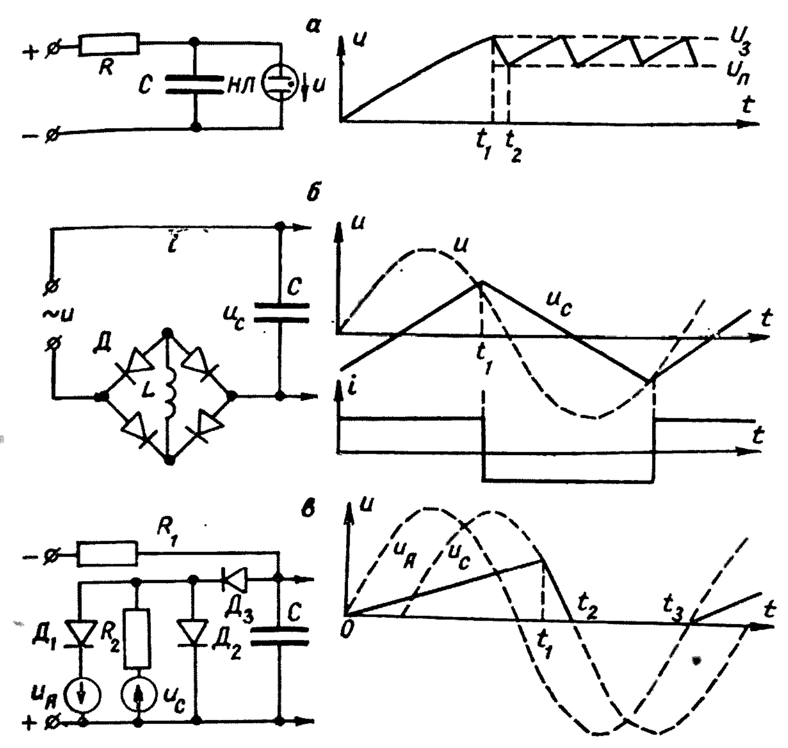


Рис. 7 Схемы релаксационного генератора на неоновой лампе (*а*), генератора треугольного (*б*) и пилообразного (*в*) напряжений

го прибора (лампы, транзистора, динистора, тиристора, тиратрона и т. д.).

Схема простейшего релаксационного генератора с емкостным накопителем показана на рис. 7, *а*. При зарядке конденсатора от источника питания через резистор R напряжение на неоновой лампе $НЛ$ достигает величины ее зажигания $U_з$ и она начинает проводить ток (момент времени t_1 на рис. 7, *а*). Конденсатор быстро разряжается на малое сопротивление проводящей ток лампы. Напряжение на нем падает до уровня $U_п$, при котором неоновая лампа погасает (момент времени t_2 на рис. 7, *а*). После этого процесс повторяется. Чем больше постоянная времени RC-цепочки ($\tau = RC$) и разница между напряжениями зажигания и погасания неоновой

лампы, тем больше период генерируемых колебаний. Амплитуда колебаний зависит только от последнего фактора.

Зарядка и разряд конденсаторов через резисторы, трансформаторы, катушки индуктивности используются в таких импульсных устройствах, как мультивибраторы, блокинг-генераторы, в которых в качестве коммутирующих элементов используются электронные лампы и полупроводниковые приборы.

На рис. 7, *б* приведена схема генератора треугольного напряжения. Его действие основано на перезарядке конденсатора постоянным током, получаемым от сети переменного тока за счет включения последовательно с конденсатором диодного моста с дросселем L, имеющим большую индуктивность. Схема простого генератора пилообразного напряжения с диодным коммутатором и временные диаграммы, поясняющие его работу, см. на рис. 7, *в*.

На рис. 7, *в* u_A и u_C — фазные напряжения в трехфазном источнике переменного тока. При переходе напряжения u_A через нуль диод $Д_3$ запирается и конденсатор заряжается от источника постоянного напряжения через резистор R_1. Емкость конденсатора и сопротивление резистора R_1 выбраны такими, чтобы обеспечить зарядку конденсатора на начальном участке экспоненты (см. пункт 2). Напряжение на конденсаторе нарастает во времени по закону, близкому к линейному, до момента времени t_1, когда оно становится равным напряжению u_c. Диод $Д_3$ отпирается, и конденсатор начинает разряжаться, повторяя при малом сопротивлении резистора R_2 напряжение u_c. В момент времени t_2 отпирается диод $Д_2$ и напряжение на конденсаторе перестает изменяться до момента времени t_3, когда процесс повторяется. Диод $Д_1$ служит для предотвращения режима короткого замыкания фазы A.

ГЛАВА II

УСТАНОВКИ И УСТРОЙСТВА С ЕМКОСТНЫМИ НАКОПИТЕЛЯМИ ЭНЕРГИИ

5. Технологические установки с емкостными накопителями энергии

На основе емкостных накопителей энергии созданы различные электротехнологические установки.

В устройствах разрядно-импульсной технологии используется преобразование электрической энергии заряженного конденсатора в другие виды энергии. При этом происходит воздействие на материалы, приводящие к обработке и преобразованию их.

В установках магнитно-импульсной технологии при разряде конденсатора на катушку (индуктор) возникают мощный импульс тока (см. пункт 3) и связанное с ним магнитное поле. Импульсы тока большой силы, проходящие даже через малые активные сопротивления металлов, приводят к значительному тепловыделению (термоимпульсная технология). Наконец, разряд конденсатора через электроды, находящиеся в газовой или жидкой среде, используется в установках плазменной, электроискровой и электродинамической технологии.

Одним из первых в магнитно-импульсной технологии стал применяться разряд конденсатора для намагничивания сердечников постоянных магнитов. Для этого необходимы импульсы магнитного поля большой напряженности и относительно большой длительности (тысячные и сотые доли секунды).

Емкостные накопители намагничивающих установок представляют собой батареи конденсаторов сравнительно большой емкости (сотни и тысячи микрофарад) при напряжениях в тысячи вольт. Соответствующим выбором параметров разрядного контура в этих установках обеспечивается апериодический характер разряда конденсатора (см. пункт 3). Генераторы импульсов тока с колебательным разрядом конденсаторов

применяются в установках для размагничивания ферромагнитных деталей точных механизмов (часов, гироскопов и др.).

Воздействие мощных импульсов магнитного поля на металлы используется для их электродинамической обработки. Пластическая деформация металлов индукторов магнитного поля и даже их разрушение под действием сил, возникающих при прохождении импульсов тока большой амплитуды (сотни тысяч ампер), была обнаружена еще в 20-х годах нашего века академиком П. Л. Капицей при получении сильных магнитных полей. Однако первые технологические установки, использующие этот эффект, появились лишь в конце 50-х годов.

Принцип действия таких установок основан на том, что при изменении магнитного поля в металле обрабатываемой детали или заготовки возникают вихревые токи большой силы. Взаимодействие магнитного поля этих токов и поля индуктора, через который разряжается конденсатор, и обусловливает механические силы, приводящие к обработке металла и его трансформации. Кроме образования сил импульсного давления, достигающих сотен миллионов ньютон на квадратный метр, магнитное поле действует еще и на кристаллическую решетку металла. Это увеличивает пластичность металла. Первые установки магнитно-импульсной обработки были созданы для уменьшения диаметра труб (индуктор в них охватывает трубу) и увеличения их диаметра (индуктор помещается внутри трубы).

Теперь сконструированы и широко применяются установки для магнитно-импульсной штамповки листовых материалов. В них заготовка помещается между индуктором (здесь уже он представляет плоскую катушку) и матрицей штампа, которая может быть изготовлена даже из таких материалов, как дерево и пластмасса, поскольку кратковременный импульс сил не успевает разрушить их.

Разряд конденсатора на катушку-индуктор и образование последней мощного импульса магнитного поля используется в электродинамических преобразователях энергии для устранения осадков на катодах электролитических ванн в электрометаллургии, в установках для ковки металлов, восстановления деформированных

деталей и даже для скалывания льда с крыльев самолета. В последние годы такие преобразователи получили применение в электродинамических и электромагнитных приводах высоковольтных выключателей для повышения их быстродействия.

Эффективно применение электродинамических преобразователей для возбуждения волн колебаний в земной коре при сейсмической разведке.

С прогрессом в области получения сильных магнитных полей связано успешное развитие исследований в области термоядерного синтеза — энергетики будущего. Например, в установках типа «Токамак» импульсное магнитное поле используется для сжатия плазмы (ионизированного вещества) в предельно тонкий шнур и удержания его от соприкосновения со стенками камеры. Для получения сверхмощных импульсных магнитных полей используются накопители очень больших энергий (см. табл. 2 в пункте 2).

Импульсы сил давления получают не только в результате электродинамического, но и за счет электрогидравлического эффекта, обнаруженного еще в 30-х годах советским ученым Л. А. Юткиным. Этот эффект проявляется при возникновении в плохосжимаемых средах (обычно это жидкости — вода и др.) крутых волн давления при мощном электрическом разряде между электродами, помещенными в эту жидкость. Импульс сил возбуждает в среде волну с удельным давлением в десятки миллионов ньютон на квадратный метр. Волна давления разрушает твердые хрупкие материалы, а пластичные — деформирует. Этот эффект используют для разрушения гранита, валунов, железобетона, измельченных волокнистых материалов, штамповки и поверхностного упрочения металлов, очистки отливок от окалины, приготовления коллоидов, эмульсий, суспензий и т. д.

Установки электроплазмолиза, основанные на электрогидравлическом эффекте, дают значительный дополнительный выход плодово-ягодных соков из массы, уже прошедшей обычную механическую обработку.

Для получения разрядного тока большой амплитуды в установках с электрогидравлическим эффектом применяются батареи конденсаторов с энергией в ты-

сячи и десятки тысяч джоулей при напряжениях в десятки тысяч вольт.

Другим примером использования электрического разряда конденсаторов являются электроимпульсная и электроискровая обработка металлов. Пионером в области создания установок и исследования электроэрозионных процессов был советский ученый академик АН МССР Б. Р. Лазаренко.

В таких установках электрический разряд на малом участке обрабатываемого металла кратковременно создает высокую температуру (порядка 10^4 °С). Часть металла испаряется, расплавляется и удаляется из зоны обработки. При электроимпульсной обработке используется дуговая форма разрядов в жидкой среде (в масле, керосине и т. д.), возбуждаемых обычно с помощью генераторов однополярных импульсов тока относительно большой длительности (свыше 10^{-4} с) и скважности (отношение периода повторения импульсов к их длительности) менее пяти. Мощность таких установок находится в пределах от сотен до десятков тысяч ватт.

Работа установок электроискровой обработки основана на использовании искровой формы электрического разряда в жидкостях или газах. В них применяются генераторы мощностью от десятков ватт до единиц киловатт с емкостными накопителями, обеспечивающие несимметричные знакопеременные импульсы напряжения длительностью менее 10^{-4} с при скважности более 10. Частота повторения импульсов этих установок выше частоты установок электроимпульсной обработки и достигает десятков тысяч герц.

Электроэрозионные установки позволяют снимать слои металлов высокой твердости, получать сложные профили деталей, гравировать, осуществлять их клеймение, наносить слои металла с целью восстановления изношенных участков, производить упрочение и легирование поверхностей деталей.

В последнее время появились сообщения о попытках применить импульсный разряд батарей конденсаторов для более полного извлечения нефти из недр Земли.

Преобразование энергии заряженного конденсатора в тепловую используется в установках импульсной

сварки металлов. В них через электроды, сжимающие свариваемые металлические детали, пропускается импульс разрядного тока, амплитуда которого зависит от толщины деталей. Энергия, выделяющаяся в зоне контактирования деталей ($I^2 \cdot r_п \cdot t_и$, где I — действующее значение импульса тока, $r_п$ — переходное сопротивление контакта между деталями, $t_и$ — длительность импульса тока), должна быть достаточной для расплавления металла в этой зоне. В результате происходит соединение деталей.

Для импульсной конденсаторной сварки используется либо непосредственный разряд конденсатора (в случае деталей малых размеров), либо он осуществляется через понижающий трансформатор (для сваривания деталей больших размеров и толщин). Этот вид сварки характеризуется такими важными свойствами, как стабильность подводимой энергии $\left(\frac{CU^2}{2}\right)$ независимо от переходного сопротивления $r_п$, малое время сварки (сотые и тысячные доли секунды), ее высокое качество (особенно для цветных металлов) благодаря локализации места нагрева. Достоинством импульсной конденсаторной сварки являются также равномерность нагрузки питающей сети и потребления энергии, высокий коэффициент мощности установок (при неуправляемом выпрямителе в зарядном устройстве).

6. Емкостные накопители в высокоинтенсивных источниках света

Высокоинтенсивные источники света — это электрические лампы низкого и высокого давления, наполненные парами и газами различных веществ (ртути, натрия, ксенона и т. д.). В них под действием электрического напряжения возникает газовый разряд, приводящий к ионизации атомов и интенсивному свечению этого пара или газа.

Различают источники света непрерывного и импульсного режимов работы. Источники света непрерывного режима предназначены для освещения жилых помещений и больших открытых пространств. Это широко распространенные люминесцентные лампы дневного

света, ртутные и натриевые лампы для освещения улиц.

Источники света импульсного режима работы создают прерывистый световой поток и служат для фотографирования (лампы-вспышки), сигнализации, накачки (возбуждения) импульсных оптических квантовых генераторов (лазеров). Они также применяются в светотехнологии, полиграфии, медицине, для проведения ускоренной киносъемки и т. д. Питаются импульсные лампы от генераторов, формирующих электрические импульсы тока длительностью от миллиардных до сотых долей секунды, с энергией от единиц до тысяч джоулей при напряжениях от сотен до нескольких десятков тысяч вольт.

Благодаря высокой импульсной мощности этих источников света (для различных условий применения мощность электрического импульса в основном за счет его кратковременности может достигать сотен тысяч и даже миллионов киловатт) получают импульсы света очень высокой интенсивности.

Конечно, не вся накопленная конденсатором энергия переходит в энергию светового излучения. Большая часть ее теряется в виде тепла (в таких случаях говорят, что коэффициент полезного действия преобразователя энергии низкий). Однако даже получаемой в итоге мощности светового импульса часто вполне достаточно для выполнения требуемых функций.

Импульсный световой поток большой мощности особенно необходим для индикации источников света на больших расстояниях из-за поглощения световой энергии атмосферой (водяным паром, частичками пыли и т. д.). Поэтому импульсные источники света нашли широкое применение для целей сигнализации на маяках, транспортных средствах (самолетах, кораблях).

Так, вспышки ксеноновой лампы с красным светофильтром (красный свет меньше поглощается атмосферой) самолетной сигнальной установки при высоте полета в несколько километров видны за 50—60 км, а вспышки судовых сигнальных ламп даже ярким солнечным днем — на расстоянии до нескольких километров.

Часто первичные источники энергии (электрохимические батареи, аккумуляторы и др.) имеют малую

мощность и низкое напряжение. Для разгрузки питающей сети от пиков мощности энергии, потребляемой импульсными источниками света, и для получения высокого напряжения вторичные источники питания таких устройств всегда содержат преобразователи вида и значения напряжения, а также накопители электрической энергии. Для большинства высокоинтенсивных импульсных источников света используют емкостные накопители энергии, т. е. конденсатор или батарею конденсаторов. Так как импульсные газоразрядные лампы при зажигании представляют собой малые сопротивления, вторичные источники питания таких ламп, по существу, представляют собой генераторы импульсов сильного тока (см. пункт 3). (Принцип устройства их представлен на рис. 2, *а*.)

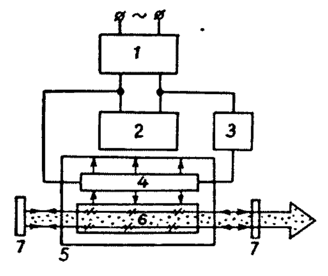


Рис. 8. Схематическое изображение рубинового лазера с импульсным возбуждением лампы-вспышки:

1 — зарядное устройство; *2* — емкостный накопитель; *3* — коммутирующий элемент; *4* — газоразрядная лампа; *5* — рефлектор, *6* — активная среда (рубиновый стержень); *7* — полупрозрачные зеркала

С помощью импульсных источников света возбуждаются оптические квантовые генераторы (ОКГ) — лазеры (рис. 8).

Электрический импульсный разряд заряженного накопителя через лампу-вспышку дает очень яркий световой импульс с энергией порядка тысячи джоулей при длительности в несколько миллисекунд, т. е. его мощность порядка нескольких сотен киловатт.

Импульсное излучение этой лампы с помощью рефлектора (отражателя) концентрируется на кристалле рубина — активной среде ОКГ. Часть этой энергии возбуждает ионы хрома, содержащиеся в рубине, т. е. их электроны переходят на более высокие энергетические уровни.

Когда число возбужденных ионов превысит число ионов, находящихся в основном состоянии, возникает усиление излучения, распространяющегося между полупрозрачными зеркалами 7, образующими своеобразный резонатор. В завершающей фазе запасенная в ионах

энергия в результате лавинообразного нарастания интенсивности излучения испускается в виде когерентного (монохроматического) светового импульса энергией порядка 1 Дж и длительностью около 10^{-3} с, т. е. мощностью примерно 1 кВт.

Коэффициент полезного действия преобразования энергии света лампы-вспышки в энергию когерентного излучения здесь очень низкий (менее 1%). Однако лазерный луч имеет очень высокую плотность энергии (порядка 10^{10}—10^{12} Вт/см^2), его можно сфокусировать до размера длины волны излучения с малым углом расхождения светового луча.

Таким образом, ценой безвозвратной потери большей части энергии конденсаторной батареи получается электромагнитная энергия очень высокого качества (в луче лазера свет распространяется в виде почти плоской волны и практически представляет собой колебания одной стабильной частоты и фазы).

Приведенные выше параметры излучаемого ОКГ импульса света относятся к первому в мире рубиновому лазеру, созданному в 1960 г. в США.

Разработано уже много разновидностей лазеров с твердой, жидкой, газообразной усиливающей средой импульсного и непрерывного режима работы.

Путем сокращения длительности излучаемого лазером светового импульса достигнуты пиковые мощности в сотни миллионов ватт. Энергии излучаемых импульсов достигли тысячи джоулей и продолжают наращиваться.

Создание и развитие лазеров привели к появлению новой области науки и техники, решающей проблемы получения и использования концентрированной световой энергии. По своему революционизирующему значению лазерная техника стоит в одном ряду с дискретной и микроэлектронной полупроводниковой техникой.

Лазеры уже применяются во многих областях науки, техники, медицине, сельском хозяйстве.

Лазерная связь со световодами и без них, делающая первые шаги, в будущем, возможно, станет основным видом связи, в том числе космической.

Лазерные локаторы — точнейшее средство для осуществления измерений, о которых ранее приходилось только мечтать. Так, уже в 1965 г. советские ученые с

помощью лазера определили расстояние до Луны с погрешностью в несколько сот метров. Сейчас аппаратурная погрешность составляет сантиметры.

С развитием мощной лазерной техники связано одно из направлений создания энергетических реакторов термоядерного синтеза. Лазеры получили широкое применение для технологических целей — сварки, резки материалов, получения чистых веществ и т. д.

Для емкостных накопителей лазерных систем созданы и продолжают разрабатываться энергоемкие, компактные и долговечные конденсаторы.

7. Защита электрооборудования от перенапряжений с помощью конденсаторов

Большая часть аппаратов, служащих для включения и отключения электрического тока и напряжения, являются контактными, т. е. в них имеются узлы, которые соединяясь образуют механический (и электрический) контакт, а разъединяясь — разрыв в цепи. К таким элементам относятся разнообразные реле, выключатели, переключатели и т. д.

Каждый раз, когда контакты таких элементов замыкают или размыкают цепь, в которой может проходить электрический ток, между ними способен развиваться пробой в форме дугового, искрового либо тлеющего разряда.

При замыкании контактов пробой возникает в результате возрастания напряженности электрического поля E из-за уменьшения расстояния между контактами $\left(E=\frac{U}{d}\right.$, где U — напряжение между контактами, d — расстояние между ними$\left.\right)$. Из формулы следует, что при d, стремящемся к нулю, напряженность E стремится к бесконечности.

Пробой при замыкании контактов продолжается до тех пор, пока они не замкнутся.

При размыкании цепи, в которой протекал ток, между контактами также возникает пробой в виде искры или дуги, который прекращается, как только исчезнут

условия, необходимые для поддержания тока между контактами.

Особую неприятность представляет пробой, возникающий при размыкании контактов, последовательно с которыми включена катушка индуктивности. Электродвижущая сила самоиндукции катушки $e = -L\frac{di}{dt}$, возникающая под действием спадающего магнитного поля, способна довольно долго поддерживать электрическую дугу между контактами, особенно в цепях постоянного напряжения. При замыкании контактов возникают проблемы в цепи с конденсатором, который при малых последовательных сопротивлениях в цепи способен дать большой импульс тока (см. пункт 2).

При каждом пробое происходит разрушение материала контактов, и они постепенно выходят из строя. Кроме этого, пробой вызывает высокочастотные электромагнитные колебания (все, вероятно, слышали щелчки в радиоприемнике и сбои в работе телевизоров при включении и отключении источников света, бытовых и других приборов), а также всплески напряжения в цепи. Таким образом, здесь имеет место не только износ контактов, но и образование коммутационных помех и перенапряжений.

Перенапряжения в высоковольтных электрических сетях возникают не только в результате коммутации (включений, отключений, переключений трансформаторов и другого оборудования), но и в результате ударов молний — грозовые перенапряжения.

В вентильных преобразователях электрической энергии (выпрямителях, инверторах, импульсных регуляторах постоянного напряжения, преобразователях частоты) коммутации управляемых и неуправляемых вентилей (диодов, триодов, тиристоров, электронных ламп и т. д.) происходят с частотой управления, которая для разных устройств может лежать в диапазоне от долей герц до десятков, даже сотен тысяч герц.

Так как все цепи, как бы тщательно они ни были выполнены, обладают некоторой индуктивностью, каждая коммутация вентилей, сопровождающаяся обрывами тока, приводит к возникновению коммутационных всплесков напряжения. Эти перенапряжения представляют собой также угрозу электрической изоляции обо-

рудования (под их действием она быстро старится и может даже пробиться) и уж, конечно, представляют опасность для таких чувствительных к превышению напряжения элементов, как полупроводниковые.

Если даже не принимать во внимание возникающие при коммутациях электромагнитные помехи, то без подавления всплесков перенапряжений в таких устройствах пришлось бы выбирать элементы и изоляцию оборудования на значительно более высокие напряжения, чем это необходимо при отсутствии этих всплесков, что удорожает устройства.

Учитывая серьезность проблемы, разработано много схемных решений и устройств для ограничения пиков напряжений, их демпфирования (сглаживания) и подавления высокочастотных колебаний, возникающих при коммутациях. Это варисторы — нелинейные резисторы — полупроводниковые приборы типа стабилитронов, разрядники и другие элементы.

На рис. 9 приведена электрическая цепь, состоящая из источника напряжения *U*, контактов *K* (они могут отображать как контактный, так и бесконтактный коммутирующий элемент) и нагрузки, содержащей индуктивность *L* и резистор *R*. Внутри схемы рис. 9 показано три способа защиты контактов, которые обычно

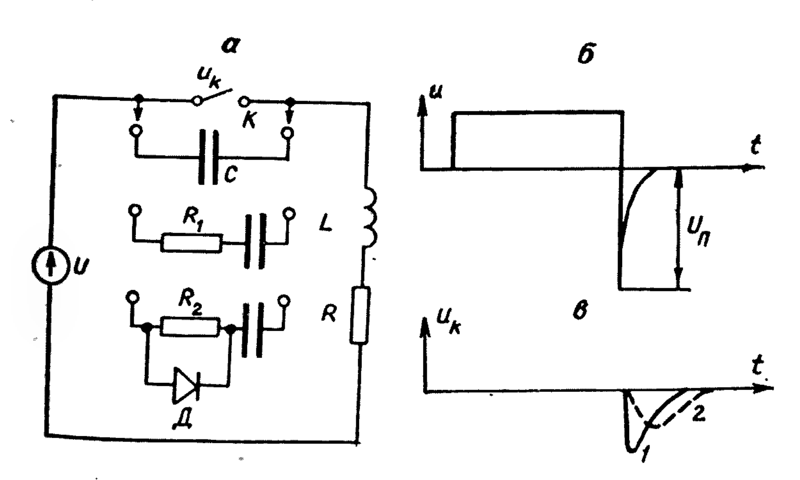


Рис. 9. Схемы устройств подавления искрения контактов выключателя (*а*) и кривые напряжения на нагрузке (*б*) и контактах (*в*)

применяются в таких случаях. Если к контактам подключен конденсатор, то в момент размыкания контактов ток нагрузки начинает проходить через него и при достаточно большой емкости дуговой разряд между контактами не возникает.

Энергия, накопленная в индуктивности L, почти полностью переходит в энергию заряженного конденсатора $\left(\frac{LI^2}{2} \approx \frac{CU^2}{2}\right)$, некоторая часть энергии теряется в резисторе R. При малой емкости конденсатора напряжение на нем будет быстро нарастать во времени. Если контакты не успеют разойтись на достаточное расстояние, а напряжение на конденсаторе будет уже значительным, то произойдут ионизация воздуха между контактами и дуговой пробой промежутка. Поэтому в таких устройствах согласуют скорость нарастания напряжения и скорость расхождения контактов, применяя конденсаторы соответствующей емкости.

Но теперь возникает следующая проблема. При включении контактов K ток разряда конденсатора будет очень велик (он ограничен лишь его внутренним сопротивлением, сопротивлением дуги при пробое и сопротивлением проводников и контактов K). Основная доля энергии конденсатора при этом пойдет на разрушение контактов.

Поэтому такая простая схема защиты дополняется рядом элементов. Например, последовательно с конденсатором включают резистор R_1, ограничивающий ток разряда C при включении контактов K. При этом желательно, чтобы сопротивление резистора R_1 было большим (ток разряда конденсатора при замыкании контактов будет при этом малым). Но чем больше это сопротивление, тем меньше защитное действие этой цепочки при размыкании контактов (очень большое сопротивление R_1 эквивалентно отсутствию конденсатора C).

Тем не менее удается подобрать компромиссные величины сопротивления резистора и емкости конденсатора, позволяющие эффективно защищать контакты и снижать амплитуду перенапряжения на них при размыкании ($U_п$ на рис. 9, *б*). Такая простая RC-цепочка благодаря малым габаритам и низкой стоимости нашла широкое применение не только для этих целей, но и для демпфирования высокочастотных колебаний,

поскольку резистор R_1 увеличивает их затухание. Вместе с тем из-за наличия резистора R_1 в начальный момент времени при размыкании контактов K на них возникает напряжение $U \approx I_н R_1$, где $I_н$ — ток нагрузки, из-за чего на начальном этапе размыкания все же возникает дуговой разряд.

Поэтому желательно, чтобы при размыкании контактов активное сопротивление цепи с конденсатором было минимальным, а при замыкании — максимальным. Для этого включают диод $Д$ параллельно резистору $R_2 \gg R_1$, через который протекает ток при размыкании контактов. При замыкании контактов конденсатор разряжается через резистор R_2, который здесь может иметь существенно большее сопротивление, чем в предыдущем случае. Скорость восстановления напряжения на контактах оказывается меньшей, чем при применении простой RC-цепочки (сравните кривую *2* с кривой *1* рис. 9, *в*).

Для повышения надежности работы электрического оборудования от влияния различного рода перенапряжений используют комплекс защитных средств. В частности, параллельно защищаемому объекту включают конденсаторы и RC-цепочки (рис. 10, *а*). Этот способ в сочетании с другими используют, например, для защиты электродвигателей на ядерных электростанциях. Защитные конденсаторы и RC-цепочки уменьшают амплитуду перенапряжений и снижают их крутизну (см. кривые *1* и *2* рис. 10).

В вентильных преобразователях энергии применяют и более сложные цепочки, например в виде одной из схем, показанных на рис. 10, *б*. В ней, по существу, для защиты контактов использован изложенный выше принцип.

В схеме рис. 10, *б* RC-цепочки с диодами шунтирует силовой полупроводниковый полууправляемый вентиль-тиристор T, являющийся бесконтактным коммутирующим элементом.

Верхняя RC-цепочка предназначена для защиты тиристора от перенапряжений, которые действуют на него в обратном направлении (т. е. когда плюс подан на катод, а минус — на анод). Пик перенапряжения возникает в конце этапа выключения тиристора (при обрыве его обратного тока), когда происходит быстрое

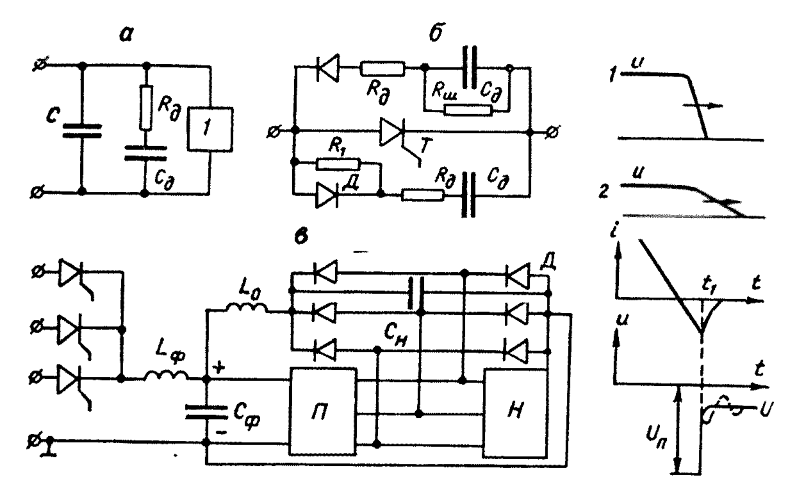


Рис. 10. Схемы защиты оборудования от перенапряжений с помощью конденсатора и простой *RC*-цепочки (*а*) и более сложных цепей (*б*) и (*в*). Волна перенапряжения при отсутствии (*1*) и наличии (*2*) конденсатора

рассасывание накопленных в нем носителей (момент t_1 на диаграмме в правой части рис. 10, *в*). При отсутствии *RC*-цепочки на тиристоре возникает кратковременный, но большой по амплитуде ($U_п$) пик перенапряжения, способный вызвать электрический пробой полупроводниковой структуры тиристора. При включении *RC*-цепочки этот пик резко уменьшается. Подбором сопротивления резистора $R_д$ добиваются устранения колебательного характера обратного напряжения на тиристоре (пунктирная затухающая синусоида на рис. 10, *в*). Нижняя (на рис. 10, *б*) *RC*-цепочка защищает тиристор *Т* от перенапряжений в прямом направлении. Она же уменьшает скорость нарастания прямого напряжения, что важно для предотвращения самопроизвольного отпирания тиристора за счет токов управления, протекающих через паразитную емкость центрального *p—n*-перехода.

Довольно часто применяют одну простейшую *RC*-цепочку, которая компромиссно выполняет обе указанные функции.

Существует также множество других схемных решений, направленных на ограничение перенапряжений

на тиристорах и других вентилях, в основе которых лежит принцип диодного ограничения уровня.

Одна из схем устройства для ограничения перенапряжений на выходе полупроводникового преобразователя (инвертора) *П* показана на рис. 10, *в*. Эти перенапряжения могут возникать из-за сброса (резкого уменьшения) нагрузки (*Н*). При полной нагрузке преобразователя диоды трехфазного неуправляемого мостового выпрямителя, подключенного к выходным шинам преобразователя, заперты напряжением звена постоянного тока. При сбросе нагрузки повышается напряжение на выходе *П* за счет энергии реактора $L_ф$, что приводит к отпиранию диодов мостового выпрямителя *Д* и к зарядке избыточной энергией конденсатора $C_н$. Одновременно через реактор $L_о$ избыточная энергия из конденсатора $C_н$ передается в звено постоянного тока — в цепь питания преобразователя. Специальная система регулирования (на рис. 10, *в* она не показана) воздействует на входной трехфазный нулевой управляемый выпрямитель, что приводит к снижению напряжения на выходе преобразователя и восстановлению его нормального уровня.

Таким образом, в защитных цепях с конденсаторами рабочим процессом является накопление энергии, а вспомогательным — рассеяние этой энергии в резисторах или рекуперация (возврат) в источники питания.

8. Емкостная коммутация электрических вентилей

Мы рассмотрели отдельные технические устройства, в которых рабочим этапом в процессе зарядки и разряда накопительных конденсаторов были их разряд (генераторы импульсов тока и напряжения) и зарядка (устройства для защиты оборудования от перенапряжений).

Однако существует довольно многочисленная группа электротехнических устройств, в большинстве которых оба этапа в работе импульсного конденсатора (и зарядка и разряд) являются рабочими. Это вентильные преобразователи электрической энергии. Они служат для трансформации рода тока (выпрямители пре-

образуют переменный ток в постоянный, инверторы осуществляют обратное преобразование), преобразования и плавной регулировки частоты переменного тока, изменения числа его фаз, преобразования источников напряжения в источники тока и наоборот. Вентильные устройства позволяют плавно регулировать напряжение переменного и постоянного тока. На основе электрических вентилей создается бесконтактная и комбинированная коммутационная аппаратура (выключатели постоянного и переменного тока, переключатели и др.), т. е. устройства, служащие для отключения тока без электрической дуги.

В большинстве этих устройств кроме вентилей (элементов, пропускающих ток только в одном направлении), трансформаторов, катушек индуктивности неотъемлемым элементом являются конденсаторы. Без конденсаторов многие из упомянутых устройств не могли бы функционировать, а часть из них была бы менее эффективной.

В предыдущем пункте уже рассматривалось применение конденсаторов для защиты вентилей от перенапряжений. Однако кроме демпфирующих конденсаторов, имеющихся во всех вентильных преобразователях, в некоторых из них применяются так называемые коммутирующие конденсаторы. Они осуществляют принудительное включение и выключение (коммутацию) неуправляемых и неполностью управляемых электрических вентилей. Полностью управляемые приборы (транзисторы, двухоперационные тиристоры, электронные лампы с управляющими сетками и др.) можно включить — перевести из закрытого (непроводящего) состояния в открытое (проводящее ток) и наоборот — выключить в нужный момент времени путем подачи на их управляющий электрод соответствующего сигнала управления.

Неуправляемые вентили (диоды) отпираются (переходят из непроводящего состояния в проводящее) тогда, когда напряжение, воздействующее на диод, приложено в проводящем направлении, т. е. плюсом на анод и минусом на катод.

Для отпирания неполностью управляемых вентилей (тиристоров, симмисторов, тиратронов, игнитронов и т. д.) это условие является необходимым, но недоста-

точным, так как такие вентили переходят в проводящее ток состояние только после подачи на их управляющий электрод специального импульса. Для выключения таких вентилей необходимо снизить проходящий через них ток ниже некоторого значения (ток удержания), благодаря чему носителей тока станет недостаточно для удержания таких приборов в проводящем состоянии и они выключаются. Каждый из этих приборов имеет свои параметры, характеристики, достоинства и недостатки, определяющие области их применения.

В преобразовательных устройствах используют естественную и принудительную коммутацию неуправляемых и неполностью управляемых вентилей. При естественной коммутации включение и выключение вентилей происходят под действием напряжения питающей сети переменного тока. Естественная коммутация диодов, например, происходит в обычных неуправляемых выпрямителях.

Для осуществления принудительной коммутации вентилей необходимы специальные так называемые коммутирующие узлы — устройства, позволяющие в нужный момент времени снизить ток вентиля, проводящего ток, и включить очередной вентиль даже тогда, когда этому препятствует напряжение питающей сети.

Большинство узлов принудительной коммутации вентилей для ее осуществления содержат емкостные

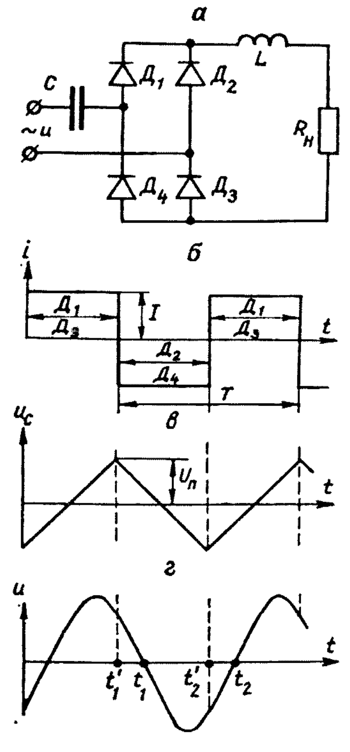


Рис. 11. Схема однофазного неуправляемого выпрямителя с принудительной емкостной коммутацией вентилей (*а*) и временные зависимости тока конденсатора (*б*), напряжения на конденсаторе (*в*) и напряжения сети (*г*)

накопители энергии. В простейшем случае коммутирующий узел содержит только конденсаторы переменного тока. Например, если последовательно в цепь питания выпрямителя включить конденсатор (рис. 11, *а*), то при протекании через него тока выпрямителя, имеющего при большой индуктивности реактора L форму прямоугольных блоков (рис. 11, *б*), напряжение на нем будет иметь треугольную форму (рис. 11, *в*). В этом случае коммутация вентилей (переключение тока с одной пары диодов на другую) будет уже происходить не в моменты времени t_1' и t_2' — моменты естественной коммутации вентилей под действием напряжения сети при отсутствии конденсатора, а в моменты времени t_1' и t_2' — принудительная коммутация под действием суммарного напряжения сети и конденсаторов (рис. 11, *г*).

Как видим (рис. 11, *г*), принудительная коммутация диодов в таком устройстве происходит во времени раньше естественной. Это обусловливает очень важное положительное качество выпрямителей с принудительной коммутацией — способность потреблять отрицательную (или, что то же, генерировать положительную) реактивную мощность.

При уменьшении емкости коммутирующего конденсатора C увеличивается треугольное напряжение на нем $\left(U_п = \frac{IT}{2C}\right)$. В результате моменты коммутации диодов сдвигаются в сторону еще большего опережения моментов естественной коммутации. Это приводит к увеличению генерируемой выпрямителем реактивной мощности, однако при этом потребуются конденсаторы, диоды и реактор L на более высокие рабочие напряжения.

Кроме рассмотренного способа одноступенчатой коммутации вентилей используется двухступенчатая коммутация с помощью вспомогательных вентилей.

Принцип принудительной емкостной коммутации вентилей, аналогичный описанному, используется в так называемых компенсационных выпрямителях с более сложными схемами и соответственно более гибким управлением. Исследованием и внедрением их в практику уже много лет занимаются советский ученый-электротехник член-корреспондент АН УССР И. М. Чиженко и его ученики.

Если выпрямители благодаря принудительной емкостной коммутации вентилей приобретают новое положительное свойство, то такие широкие классы преобразовательных устройств, как автономные инверторы и импульсные регуляторы постоянного напряжения на тиристорах, без конденсаторов не были бы работоспособными или были бы сложнее и более громоздкими.

В этих устройствах (и в уже рассмотренных) узлы принудительной коммутации придают неполностью управляемым вентилям свойство полной управляемости. Существует большое число видов и схем узлов принудительной коммутации (параллельная, последовательная, одно- и двухступенчатая и т. д.). Однако, по существу, их работа сводится к созданию направленного навстречу току нагрузки импульса коммутирующего тока через вентиль, который необходимо выключить. Если амплитуда коммутирующего тока равна основному току, то суммарный ток через вентиль оказывается равным нулю, чем обеспечивается выключение вентиля. Для того чтобы неполностью управляемый вентиль после прекращения тока через него восстановил способность выдерживать электрическое напряжение в прямом направлении, состояние с нулевым током через тиристор необходимо поддержать в течение некоторого времени, называемого временем восстановления. За это время, составляющее от единиц до сотен микросекунд для современных полупроводниковых приборов, носители тока в полупроводниковой структуре рекомбинируют. Для ускорения процесса рекомбинации носителей к вентилю прикладывают обратное напряжение (плюс на катод и минус на анод). Это также происходит под действием напряжения на коммутирующем конденсаторе.

Для надежной коммутации вентилей импульс коммутирующего тока должен иметь амплитуду, превышающую максимальный ток нагрузки, проходящей через вентиль.

Таким образом, узел принудительной коммутации в ряде устройств представляет собой источник импульсов тока, работающий периодически в моменты времени, определяемые системой управления.

Первоначальный заряд емкостного накопителя энергии таких узлов производится обычно от основного ис-

точника питания. Далее потери энергии в активных сопротивлениях контура коммутации компенсируются дозарядом конденсаторов при коммутациях от основного источника питания либо от вспомогательного источника питания.

Для коммутации вентилей используются преимущественно импульсы тока, имеющие вид половины волны синусоиды (резонансная коммутация, получаемая путем разряда конденсатора через линейную индуктивность), и прямоугольные импульсы тока, получаемые при разряде конденсатора через катушку с железным сердечником, имеющим прямоугольную петлю гистерезиса, т. е. через нелинейную индуктивность. Используются также многоконтурные накопители (такие, как на рис. 3, *а*), формирующие ток коммутации, близкий к прямоугольному.

На рис. 12, *а* приведена схема силовых цепей комбинированного (контактно-вентильного) выключателя постоянного тока большой мощности с емкостной коммутацией тиристоров. Такие выключатели по сравнению с традиционными обеспечивают значительное сокращение времени отключения аварийных токов и более долговечны. Эти свойства достигаются за счет бездугового отключения тока.

В таком выключателе ток при его отключении предварительно под действием напряжения на конденсаторе C_1 переводится на тиристор T_1, затем на T_3, который, в свою очередь, выключается в момент времени t_{10} с помощью тиристора T_2 и конденсатора C_2. Контакты электромеханического выключателя размыкаются во время перемагничивания дросселя насыщения *ДН* (момент времени t_8 на рис. 12, *б*).

Для правильной работы выключателя необходима согласованная по времени работа вентильной части устройства и электромеханического аппарата (рис. 12, *б*).

На базе силовых полупроводниковых приборов созданы также полностью бесконтактные выключатели и импульсные регуляторы с конденсаторными узлами принудительной коммутации вентилей. Импульсные регуляторы представляют собой бесконтактный выключатель постоянного тока, рассчитанный на периодиче-

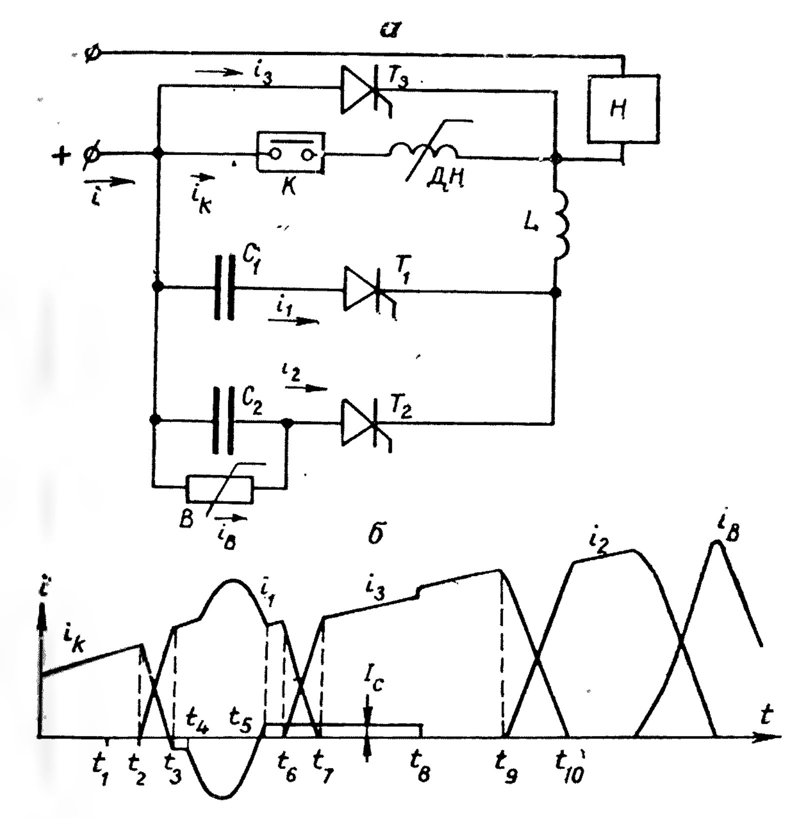


Рис. 12. Принципиальная схема мощного бездугового выключателя постоянного тока (*а*) и временные зависимости токов (*б*) в нем: *В* — варистор; *К* — контакты электромеханического выключателя

ское (с частотой от десятков до тысяч герц) включение и отключение напряжения питания. На нагрузке при этом формируется последовательность импульсов напряжения, среднее значение которого (постоянная составляющая) пропорционально частоте включения или длительности включенного состояния. Такие устройства, в частности, успешно заменяют реостатные системы регулирования скорости движения электротранспорта.

Кроме существенной экономии электроэнергии они обеспечивают плавность трогания и хода транспортных

средств. Для работы в узлах принудительной емкостной коммутации вентилей в таких устройствах разработаны специальные конденсаторы, устойчивые к действию вибраций, ударов и низких температур.

Принудительная емкостная коммутация послужит основой для создания широкой (по схемам, характеристикам) гаммы другого специфического класса преобразовательных устройств — автономных инверторов. В них неполностью управляемые вентили благодаря принудительной коммутации работают в ключевом режиме, периодически изменяя полярность подключения к нагрузке источника постоянного тока. Вследствие этого происходит преобразование напряжения и энергии постоянного тока в напряжение и энергию переменного тока.

Многочисленные схемы автономных инверторов, количество которых продолжает расти, могут быть отнесены к одной из трех основных групп: инверторы тока, инверторы напряжения и резонансные инверторы. Первые характеризуют наличие в звене постоянного тока индуктивного накопителя, вторые — емкостного. В резонансных инверторах такие накопители тоже применяют, но их энергия и мощность в силу специфики устройства и принципа действия меньше, чем в инверторах тока и напряжения.

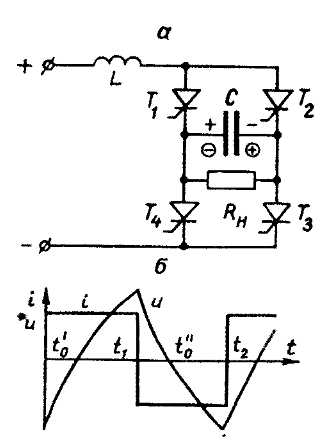


Рис. 13. Принципиальная электрическая схема силовых цепей однофазного мостового автономного инвертора тока (*а*) и временные зависимости токов и напряжений в диагонали моста (*б*)

Конденсаторы для осуществления принудительной коммутации вентилей в автономных инверторах тока включаются параллельно, последовательно и последовательно-параллельно нагрузке. В соответствии с этим инверторы получили аналогичные названия. В резонансных инверторах коммутирующие конденсаторы обычно включают последовательно с нагрузкой.

Некоторые автономные инверторы могут работать как

в режиме инвертора тока, так и в режиме резонансных инверторов — в зависимости от сглаживающей индуктивности в звене постоянного тока. Схема одного из наиболее простых из этих устройств — однофазного параллельного автономного инвертора тока, в котором с помощью конденсатора C осуществляется взаимокоммутация вентилей, показана на рис. 13. В таком устройстве вентили включаются по очереди попарно в плечах моста (одновременно проводят ток тиристоры T_1 и T_3 или T_2 и T_4). В диагональ моста включена нагрузка (здесь — это резистор с сопротивлением $R_н$) и параллельно ей — конденсатор C.

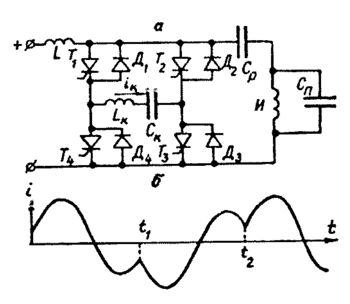


Рис. 14. Принципиальная электрическая схема силовых цепей автономного инвертора тока с резонансной коммутацией вентилей с удвоением частоты тока (a):

L — сглаживающий реактор; $L_к$ — реактор коммутирующего контура; $C_к$ — коммутирующий, $C_р$ — разделительный, $C_п$ — компенсирующий конденсаторы; $И$ — индуктор

Зависимость тока коммутирующего конденсатора от времени (б):

t_1, t_2 — моменты коммутации тиристоров

Под действием напряжения, возникающего на этом конденсаторе, осуществляется принудительная коммутация тиристоров в плечах моста. При активно-индуктивном характере нагрузки с помощью того же конденсатора компенсируется ее реактивная мощность. Таким образом, периодически переключается ток в диагонали моста (рис. 13, б), в результате чего на нагрузке и получается переменное напряжение, частота которого определяется частотой подачи импульсов управления на тиристоры, а значение и форма — нагрузкой и напряжением источника питания.

Емкость конденсатора должна быть такой, чтобы интервал времени с момента прекращения тока через тиристоры t_1 и t_2 до момента изменения полярности напряжения на конденсаторе (t_0' и t_0'') был достаточен для восстановления электрической прочности вентилей, т. е. должен быть больше времени их выключения.

На рис. 14, a приведена принципиальная схема автономного инвертора тока, являющегося источником

тока повышенной частоты для установок индукционного нагрева металлов. Как и в рассмотренном параллельном инверторе тока, тиристоры T_1—T_4 включаются поочередно парами в противоположных плечах моста (моменты времени t_1 и t_2 на рис. 14, *б*). Коммутирующий узел включен в диагональ моста и состоит из индуктивности $L_к$ и конденсатора $C_к$. Диоды $Д_1$—$Д_4$ служат для пропускания обратного тока при резонансном перезаряде коммутирующего конденсатора. Во вторую диагональ моста через разделительный конденсатор $C_р$ включена нагрузка (индуктор *И* и компенсирующий реактивную мощность индуктора конденсатор $C_п$).

Инвертор по этой схеме имеет ряд положительных свойств: он дает удвоение частоты тока на выходе, работа тиристоров облегчена за счет мягкой резонансной коммутации; его характеристики довольно хорошо согласуются с характеристиками нагрузки. В зависимости от параметров схемы или частоты переключения вентилей в нем наблюдается ряд режимов. Диаграмма для одного из режимов работы, когда ток в коммутирующем контуре непрерывен, показана на рис. 14, *б*.

Существует много других схем принудительной емкостной коммутации вентилей и устройств на их основе, в которых конденсаторы перезаряжаются током нагрузки, током вспомогательных коммутирующих цепей и вспомогательных источников питания. В них применяются конденсаторы, способные выдерживать часто повторяющиеся импульсные токи при напряжениях в сотни и тысячи вольт. Такие конденсаторы специально разрабатываются для условий работы в коммутирующих узлах, являющихся тяжелыми из-за несинусоидальной формы тока и напряжения.

9. Сглаживание пульсаций и умножение напряжения с помощью конденсаторов

Питание электронной и другой аппаратуры осуществляется, как правило, от вторичных источников — преобразователей, с помощью которых получают нужный вид напряжения (обычно это постоянное напряжение) и качество энергии. Вторичные источники также обеспечивают стабилизацию напряжения пита-

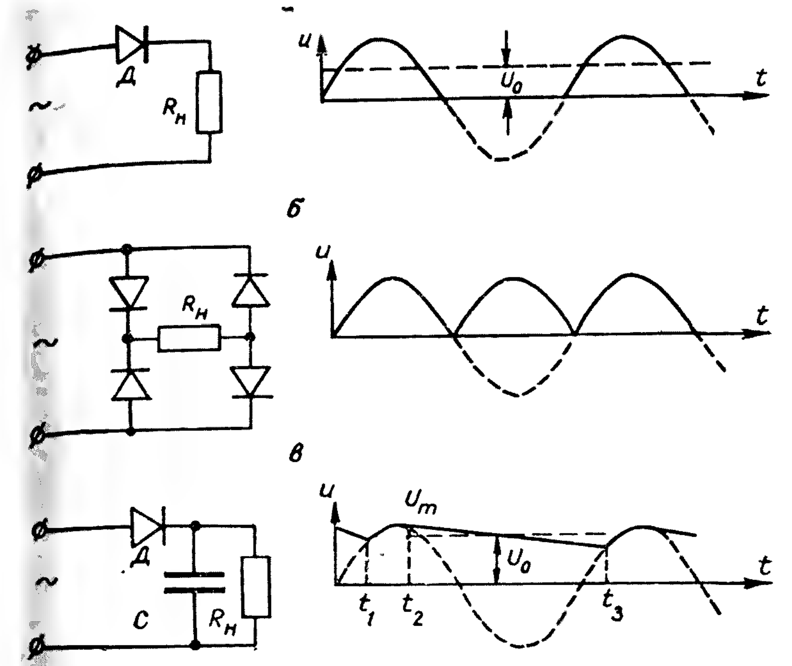


Рис. 15. Однофазный однополупериодный выпрямитель (*а*), однофазный мостовой двухполупериодный выпрямитель (*б*), однофазный однополупериодный выпрямитель с емкостным накопителем для сглаживания пульсаций (*в*) и кривые напряжения на нагрузке (сплошные линии) и штриховые линии — напряжение источника

ния и требуемый по условию работы аппаратуры процент переменной составляющей пульсирующего напряжения или процент высших гармоник в кривой переменного напряжения питания. Вторичные источники питания преобразуют энергию первичного источника (сети переменного тока, электрохимических и других источников постоянного и переменного тока).

Особенность работы некоторых преобразователей заключается в неравномерности во времени количества энергии, поступающей в нагрузку, а для некоторых это поступление носит дискретный (прерывистый) характер. Например, однофазный однополупериодный выпрямитель создает напряжение на нагрузке в виде полуволны синусоиды (рис. 15, *а*), т. е. здесь имеет место дискретное поступление энергии. В случае двух-

полупериодного выпрямителя энергия поступает в нагрузку непрерывно, но неравномерно (рис. 15, *б*). Прерывистый характер преобразования энергии первичного источника имеет место в импульсных регуляторах и стабилизаторах напряжения постоянного тока, получивших широкое распространение в последнее время в качестве вторичных источников питания ЭВМ, двигателей постоянного тока и других нагрузок.

Ряд вторичных источников питания содержит несколько преобразователей, например выпрямитель и автономный инвертор, у которых обычно различная частота работы и неравномерность потребления энергии. В то же время большинство нагрузок потребляет энергию непрерывно. Таким образом, для согласования различных характеров поступления и расходования энергии в составе вторичного источника питания должен быть ее накопитель, который накапливал бы поступающие порции энергии и непрерывно отдавал в нагрузку. Накопитель энергии необходим также и в случае дискретного ее потребления в нагрузке, носящего импульсный характер, что рассмотрено в предыдущих пунктах.

В качестве накопителей энергии во вторичных источниках питания широко используются катушки индуктивности и конденсаторы. Типичный случай применения конденсатора в качестве емкостного накопителя показан на рис. 15, *в*, где он подключен к выходным зажимам выпрямителя параллельно нагрузке. Выпрямленное переменное напряжение пульсирует — колеблется около среднего значения U_0. Полезной является постоянная составляющая напряжения, а переменная оказывает вредное действие.

Большинство электронных устройств требует для своего питания напряжение, в котором переменная во времени компонента пульсирующего напряжения составляла бы не более единиц и десятых долей, а в ряде устройств — сотых и даже тысячных долей процента. Такие высокие требования предъявляются, в частности, к источникам питания высококачественных усилителей звуковой частоты, некоторых измерительных устройств и в других случаях.

Из временно́й диаграммы (рис. 15, *в*) видно, что на интервале времени t_2—t_3 мгновенное напряжение сети

переменного тока (штриховая линия) меньше напряжения на конденсаторе (сплошная линия) и на этом интервале конденсатор, накопивший энергию в промежуток времени t_1—t_2, отдает ее в нагрузку. При этом напряжение на конденсаторе падает, изменяясь по закону $u=U_m e^{-t\ R_н C}$.

Чем больше емкость сглаживающего конденсатора, тем меньше пульсация напряжения на нем и на нагрузке. Таким образом, емкостный накопитель обеспечивает здесь уменьшение пульсаций напряжения на нагрузке. Одновременно он дает увеличение среднего значения напряжения на нагрузке (сравните U_0 на рис. 15, *а* и 15, *в*). При низких сопротивлениях нагрузки для получения таким путем малой пульсации требуется конденсатор с большей емкостью (постоянная времени, равная $\tau=R_н C$, должна быть значительно больше интервала времени t_2—t_3). Среднее за период напряжение на нагрузке при таком сглаживающем устройстве сильно зависит от сопротивления нагрузки, так как при его изменении спад напряжения на интервале t_2—t_3 также меняется. Кроме того, выпрямительный диод *Д* пропускает ток в течение относительно небольшого промежутка времени (t_1—t_2), т. е. через него и соответственно через конденсатор проходит ток, носящий импульсный характер.

Все эти недостатки простейшего сглаживающего устройства на основе одного накопительного конденсатора обусловливают его применение преимущественно при питании маломощных в основном высокоомных нагрузок.

В устройствах питания мощных потребителей постоянного тока при сравнительно низких требованиях к пульсациям напряжения и тока для их сглаживания применяются многофазные выпрямители с индуктивными накопителями энергии, включаемыми последовательно с нагрузкой. При высоких требованиях к пульсации напряжения в условиях малых и больших нагрузок по току используются более сложные сглаживающие фильтры, содержащие емкостные и индуктивные накопители энергии (см. пункт 12).

Конденсаторы в фильтрах вторичных источников питания кроме уменьшения пульсаций напряжения обеспечивают возможность кратковременного измене-

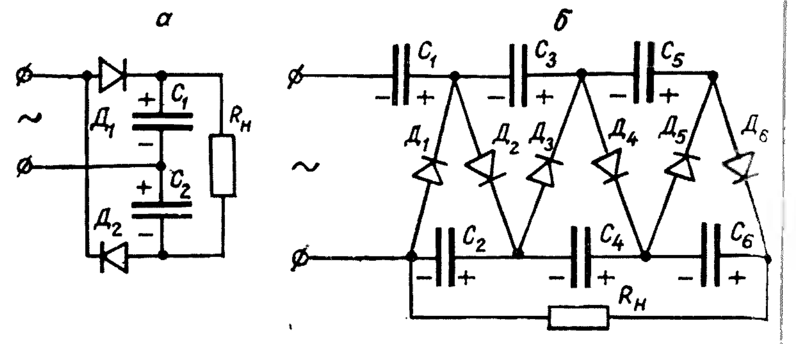


Рис. 16. Схема диодно-емкостных умножителей напряжения каскадного удвоителя (*а*) и ушестерителя (*б*)

ния направления потока энергии. Это важно для ряда режимов работы и нагрузок. Одна из основных задач, возникающих при проектировании вторичных источников питания,— это уменьшение их габаритов. Резкое уменьшение размеров электронных устройств, обусловленное переходом на микроэлектронную технику, привело к тому, что зачастую вторичные источники питания по размерам превосходят устройства, которые они снабжают энергией. Поэтому в последнее время уделяется много внимания построению малогабаритных источников питания. Один из путей решения этой проблемы заключается в применеиии более высоких частот питающего напряжения — до десятков и даже сотен тысяч герц. Создаются специальные малогабаритные конденсаторы большой емкости, способные работать при больших переменных токах, имеющих повышенные частоты.

Накопительный режим конденсаторов используется в так называемых диодно-емкостных умножителях напряжения. Эти устройства позволяют получать высокое напряжение постоянного тока от источников переменного напряжения. На рис. 16, *а* показана схема удвоителя напряжения, по существу представляющего собой два однополупериодных выпрямителя с простейшими сглаживающими фильтрами — накопительными конденсаторами. Благодаря соответствующему включению диодов $Д_1$ и $Д_2$ и последовательному соединению конденсаторов C_1 и C_2 напряжение на выходе схемы рав-

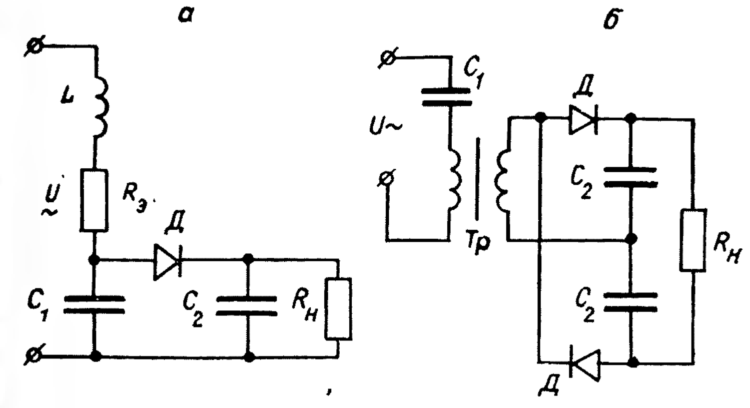


Рис. 17. Схемы резонансных умножителей напряжения: бестрансформаторная (*а*), с повышающим трансформатором и с удвоителем напряжения (*б*):

C_1 — конденсатор резонансного умножителя напряжения; C_2 — емкостный накопитель выпрямителя; $R_э$ — эквивалентное активное сопротивление контура; *Д* — диоды; $R_н$ — нагрузка; *Тр* — трансформатор

но удвоенному напряжению одиночного выпрямителя. В таком устройстве происходит поочередное выпрямление обоих полупериодов напряжения питающей сети.

Известно также несколько разновидностей каскадных умножителей напряжения. Схема одного из них приведена на рис. 16, *б*. В ней конденсаторы C_1—C_6 служат накопителями энергии. Умножение напряжения в этом устройстве происходит в результате того, что напряжение на последовательно соединенных конденсаторах суммируется, а также потому, что зарядка конденсаторов C_2—C_6 происходит под действием не только напряжения сети, но и под действием напряжения на предшествующих конденсаторах. Действительно, на первой полуволне напряжения питающей сети после его включения, при котором откроется диод $Д_1$, до амплитудного напряжения сети зарядится конденсатор C_1. На втором полупериоде напряжение сети изменит свою полярность и заряжаться через диод $Д_2$ будет конденсатор C_2. При этом последовательно с сетью окажется включенным конденсатор C_1, полярность напряжения на котором такова, что оно суммируется с сетевым напряжением. Поэтому напряжение, до которого зарядится конденсатор C_2, оказывается большим, чем ам-

плитуда напряжения сети. Такая ситуация возникает при заряде всех последующих конденсаторов. Следовательно, при использовании конденсаторов в простейших сглаживающих фильтрах и в умножителях напряжения в конденсаторах происходят сравнительно быстрое накопление энергии, поступающей из питающей сети, и медленная отдача ее в нагрузку, т. е. здесь имеет место еще одна разновидность режима работы емкостных накопителей энергии.

На рис. 17 приведены схемы резонансных умножителей напряжения. В таких умножителях напряжение на конденсаторах примерно в Q раз больше, чем у источника питания, где Q — добротность последовательного LC-контура $\left(Q=\frac{Q_L \cdot Q_c}{Q_L+Q_c}\right.$, а Q_L и Q_C — добротности катушки индуктивности и конденсатора). Здесь умножение напряжения происходит в результате накопления энергии в реактивных элементах колебательного контура за время переходного процесса после подключения устройства к сети. В установившемся состоянии энергия, поступающая из сети, равна сумме энергии, отдаваемой в нагрузку, и энергии, теряемой в виде тепла в элементах умножителя.

10. Емкостные накопители в устройствах автоматики, измерительной и вычислительной техники

Способность конденсаторов быстро накапливать и отдавать электрические заряды обусловила широкое применение емкостных накопителей в различных устройствах автоматики, измерительной и вычислительной техники. Здесь на первый план выступает не энергетическая сторона процессов обмена энергией, а информационная, т. е. конденсатор участвует в преобразовании информации.

С помощью конденсаторов, например, осуществляются интегрирование и дифференцирование электрических сигналов. Это следует из зависимости мгновенного тока, протекающего через конденсатор, от скорости изменения напряжения на его зажимах $i=C\frac{du}{dt}$ и

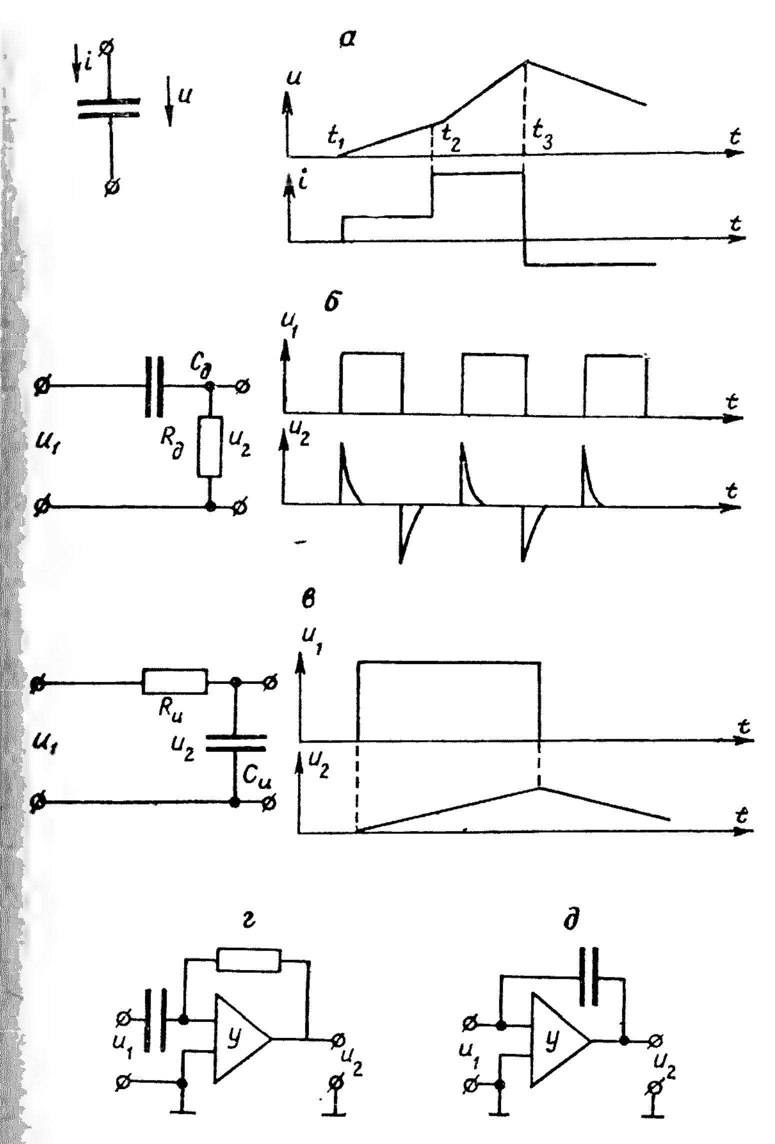


Рис. 18. Входные и выходные переменные при использовании конденсатора для интегрирования и дифференцирования электрических сигналов (*а*), дифференцирующая (*б*), интегрирующая (*в*) цепочки, дифференцирующий (*г*), интегрирующий (*д*) решающие усилители и диаграммы, иллюстрирующие их работу

соответственно зависимости мгновенного напряжения на зажимах конденсатора от протекающего через него тока $u = U_0 + \frac{1}{C}\int i dt$, где U_0 — начальное напряжение на конденсаторе

Таким образом, если считать входной переменной напряжение, а выходной — ток, то конденсатор осуществляет операцию дифференцирования, а при противоположной ситуации — интегрирования. В правой части рис. 18, *а* показаны временные зависимости тока и напряжения конденсатора, иллюстрирующие приведенные выше выражения.

Когда же входной и выходной переменными являются напряжения, то для дифференцирования и интегрирования применяют *RC*-цепочки (рис. 18, *б, в*). Качество дифференцирования и интегрирования электрических сигналов такими цепочками зависит от постоянных времени цепочек $\tau = RC$. Чем меньше $\tau_д = R_д \cdot C_д$, тем точнее происходит дифференцирование (соответственно чем больше $\tau_и = R_и C_и$, тем точнее интегрируется напряжение).

Дифференцирующая цепочка обычно имеет малое значение емкости конденсатора $C_д$. Это необходимо для того, чтобы ток, протекающий по этой цепочке под действием входного напряжения, определялся в основном сопротивлением конденсатора. Дифференцирующие цепочки применяют также для формирования коротких остроконечных импульсов, служащих для четкого запуска различных импульсных устройств. Формирование остроконечных импульсов из прямоугольных (см. рис. 18, *б*) связано с быстрым зарядом и разрядом конденсатора дифференцирующей цепочки. В интегрирующей цепочке ток определяется в основном резистором, для чего берется конденсатор $C_и$ сравнительно большой емкости, а резистор $R_и$ — большого сопротивления.

С помощью таких простых цепочек осуществляют приближенные операции дифференцирования и интегрирования, причем повышение точности их выполнения приводит к уменьшению значения напряжений на выходе цепочек Поэтому в ответственных случаях применяют *RC*-цепочки совместно с усилителями (рис. 18, *г, д*). Такие решающие дифференцирующие и интегри-

рующие усилители являются одним из основных элементов аналоговых вычислительных машин (цифровые ЭВМ работают с импульсными сигналами, аналоговые оперируют в основном с непрерывными электрическими сигналами).

Дифференцирующие и интегрирующие цепи широко применяются в устройствах автоматического регулирования. Так, сигнал, пропорциональный первой производной напряжения по времени $\left(\frac{du}{dt}\right)$, позволяет с опережением выполнять регулирование какой-либо величины, реагируя на скорость ее изменения.

Интегрирующие цепи дают возможность реагировать на длительные сигналы, что используется, например, в телевизионной и радиолокационной технике для временной селекции сигналов. Импульсные помехи, поступающие на вход интегрирующих цепей, сильно ослабляются ими и не оказывают мешающего действия. Это особенно важно, например, при управлении вентильными преобразователями, имеющими дискретное во времени управление.

Для координации моментов срабатывания реле в ряде устройств используются конденсаторы для замедления срабатывания и отпускания реле. С этой целью параллельно обмотке реле подключают конденсатор, а к этой цепочке последовательно включают резистор, т. е. при подаче напряжения цепочка RC работает как интегрирующая (она замедляет рост напряжения на реле), а при его отключении конденсатор, разряжаясь на реле, удерживает его некоторое время во включенном состоянии, т. е. конденсатор здесь выполняет функцию накопителя.

На использовании медленного роста напряжения на конденсаторе интегрирующей цепи основана работа некоторых видов электронных реле времени, позволяющих получить большие выдержки времени. На рис. 19 показана схема простейшего реле времени, в котором используется интег-

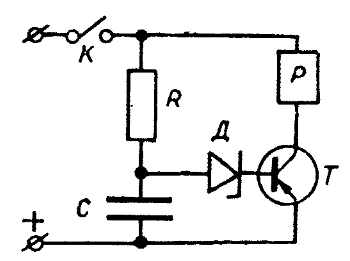


Рис. 19. Схема емкостного реле времени на транзисторе

рирующая цепочка. При включении питания ключом К напряжение на конденсаторе нарастает по закону $u = E(1 - e^{-t/RC})$. По достижении этим напряжением уровня, при котором стабилитрон *Д* начнет пропускать ток, транзистор *Т* откроется и электромеханическое реле *Р* сработает. Выдержка времени (интервал с момента включения ключа *К* до момента срабатывания реле *Р*) может изменяться путем изменения сопротивления резистора *R* или емкости *С* (последнее предпочтительнее, так как при постоянном резисторе *R* стабильнее уровень срабатывания).

В ряде других электронных реле используется разряд конденсатора, т. е. транзистор отпирается в момент времени, когда напряжение на разряжающемся конденсаторе снизится до определенного уровня.

Способность конденсатора быстро накапливать и отдавать энергию используется при создании различных детекторов модулированных сигналов, пиковых вольтметров, делителей частоты и других электронных устройств. Схема простейшего детектора модулированных по амплитуде колебаний, появление которого относится к заре радиотехники, показана на рис. 20, *а*.

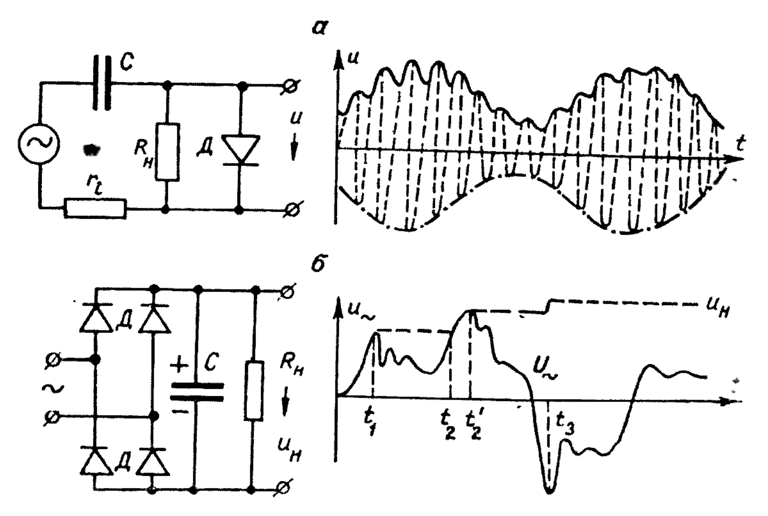


Рис. 20. Емкостные накопители в схемах однотактного амплитудного детектора (*а*) и двухтактного детектора пикового вольтметра (*б*)

Детектирование сигнала модуляции высокочастотных колебаний (штриховая кривая на рис. 20, *а*) основано на использовании нелинейных свойств диодов, триодов или других элементов. Сопротивление нагрузки детектора ($R_н$) берется значительно больше, чем сопротивление источника сигналов (r_i). Совместно с диодом *Д* это обеспечивает малую постоянную времени зарядки конденсатора ($\tau_з = r_i C$) при положительной полярности переменного напряжения и большую постоянную времени разряда конденсатора ($\tau_р = R_н C$) при отрицательной полярности напряжения. Поэтому конденсатор быстро заряжается, если мгновенное значение высокочастотного напряжения больше мгновенного напряжения на конденсаторе (диод *Д* при этом открывается и пропускает ток зарядки). В моменты времени, когда напряжение на конденсаторе больше, чем напряжение на входе детектора, диод *Д* закрыт и конденсатор разряжается (через источник) на сопротивление. Постоянная времени разряда ($\tau = RC$) такова, что она больше периода высокочастотных колебаний и меньше минимального периода модулирующих низкочастотных колебаний. Такое соотношение обеспечивает без искажений выделение огибающей модулированного сигнала (сплошная кривая на рис. 20, *а*), несущей информацию (модулирующие колебания могут передавать речь, музыку, кодированные импульсы телеизмерительных устройств и т. д.).

Конденсаторы как элементы демодуляторов используются в различных устройствах детектирования не только амплитудно-модулированных, но и модулированных по частоте, по фазе электрических колебаний.

В детекторах пиковых вольтметров постоянная времени зарядки конденсатора мала, а разряда — предельно велика. На рис. 20, *б* дана одна из схем пикового детектора на основе двухполупериодного мостового выпрямителя. Благодаря этому выпрямителю такой детектор реагирует на напряжение положительной и отрицательной полярностей. При подаче на входные зажимы переменного напряжения диоды моста остаются открытыми (проводят ток) до тех пор, пока конденсатор не зарядится до амплитуды переменного напряжения (момент времени t_1). На интервале времени t_1—t_2 напряжение на конденсаторе (штриховая линия

на рис. 20, *б*) больше, чем переменное напряжение на входе устройства, поэтому диоды *Д* моста закрыты и не проводят ток. На этом интервале времени конденсатор медленно (вследствие большой постоянной времени $\tau = R_н C$) разряжается на нагрузочный резистор $R_н$ (на рис. 20, *б* это не заметно, так как разряд незначительный).

В момент времени t_2 входное напряжение становится больше напряжения на конденсатре, диоды моста отпираются и конденсатор *C* дополнительно заряжается до амплитуды входного напряжения (момент времени t_2'). Очередной процесс заряда конденсатора наступает в момент времени t_3, когда мгновенное напряжение на входе детектора (это напряжение уже имеет отрицательную полярность) превысит напряжение на конденсаторе.

Таким образом, в этом устройстве конденсатор как бы «запоминает» максимальное по модулю входное напряжение и долго «помнит» его. Если применить в детекторе пиковых значений напряжения однополупериодный выпрямитель, то на конденсаторе будет «запоминаться» амплитуда положительной или отрицательной полярности входного напряжения. Далее это напряжение с сопротивления $R_н$ поступает на вольтметр постоянного напряжения, по которому и производится отсчет измеренной амплитуды напряжения.

На этом принципе основана работа вольтметров, измеряющих действующее значение напряжения синусоидальной формы (детектор измеряет амплитуду синусоиды U_m, а шкала вольтметра градируется в действующих значениях $U = U_m/\sqrt{2}$). Очевидно, что такие вольтметры дают правильные показания только при неискаженной форме кривой, поскольку измеряется амплитуда напряжения. При искаженной кривой, например, когда кроме синусоиды имеется еще импульсная помеха, показания прибора будут неверными — завышенными. Вольтметры термоэлектрической системы лишены этого недостатка. Они при любой форме напряжения измеряют его действующее значение (эквивалентное по теплу).

В системах управления различных устройств возникает необходимость периодического измерения и запоминания мгновенных значений напряжения. С этой

целью используют конденсатор и информационный ключ — устройство, работающее в режиме «включено — выключено». При кратковременном включении ключа конденсатор заряжается до мгновенного значения измеряемого напряжения. Ключ затем выключается, а конденсатор «запоминает» это напряжение. Непосредственно перед очередным измерением другое ключевое устройство разряжает конденсатор (происходит стирание информации), затем сразу же осуществляется новое измерение. В интервале времени, когда информационный ключ разомкнут, с конденсатора напряжение подается на управляющее устройство, т. е. происходит считывание информации. Такие системы обладают повышенной помехоустойчивостью, хотя быстродействие их несколько ограничено.

Периодическая зарядка и разряд конденсатора, при которых импульсы тока в нагрузке имеют постоянное значение, используются в так называемых емкостных частотомерах.

При зарядке конденсатора строго дозированными импульсами энергии напряжение на нем ступенчато возрастает. По достижении определенного уровня это напряжение переключает пороговое устройство. Этот принцип используется в емкостных делителях частоты. Их преимущество — возможность электрическим путем управлять коэффициентом деления.

Способность конденсаторов «запоминать» напряжение и сравнительно долго хранить эту информацию используется в цифровых и гибридных аналого-цифровых вычислительных машинах в блоках памяти. Здесь применяются конденсаторы в микроэлектронном исполнении (на одном квадратном миллиметре кремниевой пластинки размещается до 20 000 конденсаторов). Заряженный конденсатор — это «единица», разряженный — «ноль». Из таких «нолей» и «единиц» составляются числа, с которыми работает машина.

Конечно, кроме емкостных элементов памяти в ЭВМ для хранения информации используются магнитные ленты, диски, ферритовые элементы, приборы с зарядовой памятью (своеобразное сочетание полупроводника и конденсатора), а также с помощью других элементов.

ГЛАВА III

ПРИМЕНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ КАК ЭЛЕМЕНТОВ С ЧАСТОТНО-ЗАВИСИМЫМ РЕАКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

11. Конденсаторы в электронных генераторах и усилителях

Современные электронные устройства имеют самое различное назначение (это аппаратура связи, вещания, устройства измерительной и вычислительной техники, управления, технологические установки и т. д.) и характеризуются широким диапазоном частот, мощностей, напряжений. Схемы электронных устройств столь многочисленны, что их описание может быть предметом отдельной книги.

Конденсаторы широко используются в электронных устройствах, в частности в генераторах незатухающих колебаний, а также в усилительной аппаратуре, предназначенной для усиления напряжения и мощности слабых сигналов.

На примере нескольких схем покажем роль конденсаторов в таких устройствах. На рис. 21 показан электронный генератор по схеме емкостной трехточки. Конденсатор C_1 — разделительный. Его роль в том, чтобы задержать напряжение постоянного тока и пропустить переменное напряжение, т. е. здесь непосредственно используется свойство конденсатора как элемента, сопротивление которого частотно-зависимое.

В мощных ламповых генераторах этот конденсатор, называемый анодно-разделительным (одна его обкладка присоединяется к аноду лампы), должен быть высоковольтным, так как постоянное напряжение анодного питания в них достигает десятков тысяч вольт. Контурный конденсатор C_4 совместно с последовательно соединенными конденсаторами C_2, C_3 и катушкой индуктивности L образуют параллельный колебательный контур. Эти конденсаторы компенсируют реактивную мощность катушки индуктивности L, благодаря чему активный элемент генератора (транзистор или элект-

ронная лампа) преобразует энергию источника питания в энергию переменного тока, мощность которой имеет только активную компоненту (см. пункт 19). Это обеспечивает высокий КПД генератора и малые искажения формы тока.

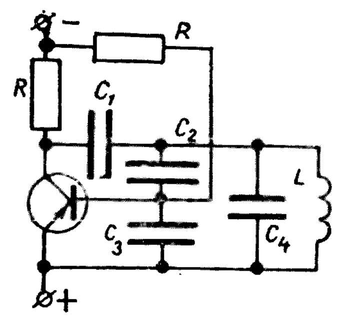


Рис. 21. Полупроводниковый автогенератор по схеме емкостной трехточки:
R — резистор

На контурные конденсаторы электронных генераторов воздействует значительное переменное напряжение, поэтому они должны иметь малые потери энергии. Конденсаторы C_2 и C_3 составляют делитель напряжения, с нижнего плеча которого (C_3) на базу триода подается часть напряжения колебательного контура. Это напряжение положительной обратной связи, управляющее током триода в такт с электрическими колебаниями в контуре, необходимо для возбуждения и поддержания автоколебаний в генераторе.

Кроме этой схемы генератора еще в 1913 г. немецким физиком Мейснером была создана схема автогенератора с трансформаторной и несколько позднее — с индуктивной обратной связью.

Мощные ламповые генераторы, применяемые в технологических установках и в радиопередатчиках, содержат большое количество конденсаторов различного назначения.

На рис. 22 показана схема мощного однотактного высокочастотного генератора для диэлектрического нагрева материалов. В нем конденсатор C_1 — блокирующий, совместно с дросселем $Др_1$ препятствующий протеканию высокочастотных токов через источник питания. Конденсатор C_2 служит для предотвращения возбуждения паразитных колебаний на других частотах. Конденсатор C_3 — блокирующий. Он шунтирует паразитную индуктивность цепи заземления катода лампы, и через него протекает ток высокой частоты генератора. Конденсатор C_4 совместно с резистором R образуют цепочку, на которой получается напряжение автомати-

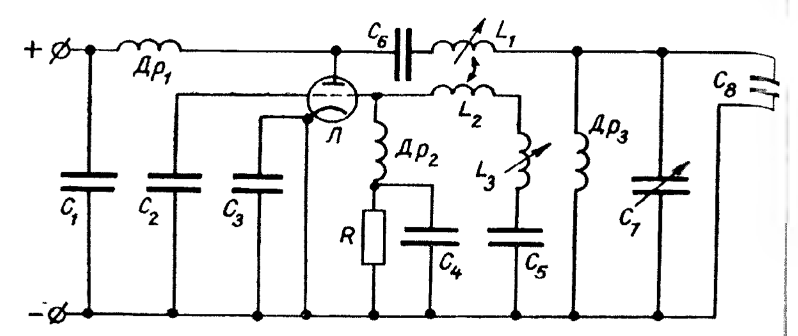


Рис. 22. Принципиальная схема лампового высокочастотного генератора с трансформаторной обратной связью

ческого смещения на сетке лампы за счет сеточного тока. Конденсатор C_5 служит для замыкания цепи положительной обратной связи и одновременно блокирует постоянное напряжение смещения на сетке лампы. Для регулировки частоты служит конденсатор переменной емкости C_7, составляющий часть контурного конденсатора. Остальную его часть образует рабочий конденсатор C_8 установки диэлектрического нагрева (см. пункт 24). Конденсатор C_6 — анодно-разделительный, его емкость, по меньшей мере, в десять раз больше емкости контурного конденсатора, чтобы он не оказывал значительного сопротивления переменному току.

Кроме рассмотренных известны и применяются другие, более простые и более сложные по схемам генераторы незатухающих колебаний на электронных лампах, полупроводниковых триодах, но основные функции конденсаторов в них те же, что и описанные выше.

Среди маломощных генераторов особую группу составляют *RC*-генераторы, у которых в цепи обратной связи включены фазосдвигающие *RC*-цепочки (см. пункт 17). Они более простые по конструкции и дешевле *LC*-генераторов, но их применение из-за влияния паразитных емкостей ограничено частотами в несколько сот килогерц. Используют эти генераторы в основном в различных измерительных устройствах.

В усилителях функции конденсаторов почти те же, что и в генераторах. Так, в апериодических усилителях, т. е. в усилителях, у которых нагрузкой служат резис-

торы или дроссели, для передачи сигналов от одного каскада усиления к следующему служат переходные цепочки; схема их такая же, как у дифференцирующей *RC*-цепочки (см. рис. 18, *б*). Емкость конденсаторов в них значительно больше, чем требуется для дифференцирования, чтобы сигналы низких частот сильно не ослаблялись и не изменялась их фаза после прохождения через цепочки. Эти конденсаторы в ламповых усилителях должны иметь очень высокое сопротивление изоляции, чтобы ток утечки через нее не влиял на напряжение на сетке лампы. В усилителях на транзисторах это требование не столь существенно (за исключением некоторых видов усилителей, например на полевых транзисторах), так как транзисторные каскады усиления имеют значительно меньшее входное сопротивление, чем ламповые. Поэтому в транзисторных усилителях в качестве переходных используют конденсаторы с оксидным диэлектриком, имеющие повышенные токи утечки, но более дешевые и малогабаритные, чем другие виды конденсаторов.

Емкость переходных конденсаторов различна в зависимости от вида усилительного элемента и минимальной частоты напряжения, которое необходимо усиливать. Так, в ламповых усилителях звуковых частот она составляет сотые доли микрофарады, в транзисторных — до десятков микрофарад.

Способность конденсатора пропускать переменный ток и задерживать постоянный используется в цепях, создающих автоматическое смещение на управляющие электроды усилительных элементов. Этой цели служат блокирующие конденсаторы с паралеллльно соединенным резистором. Такая цепочка включается в катодную или эмиттерную цепь. Постоянная составляющая тока лампы или транзистора, протекая через резистор, создает напряжение смещения, тогда как переменные токи усиливаемых сигналов проходят через конденсатор, представляющий для них малое сопротивление. Емкость конденсатора цепочки автоматического смещения достаточно большая (от десятков до тысяч микрофарад), чтобы его сопротивление даже на минимальной частоте было существенно меньше сопротивления резистора. Выполнение этого условия обеспечивает отсутствие частотно-зависимой отрицательной обратной

связи и меньшие частотные и фазовые искажения усиливаемых сигналов.

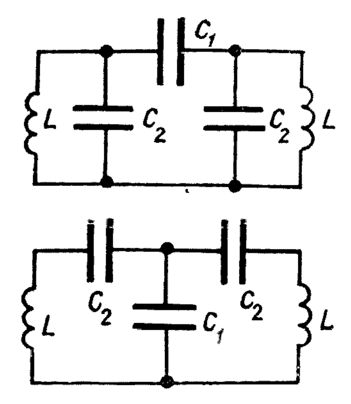


Рис. 23. Схемы осуществления емкостной связи между колебательными контурами:
C — конденсатор связи

В резонансных усилителях нагрузкой активных (усиливающих сигналы) элементов (ламп, транзисторов и т. д.) является параллельный *LC*-контур или система из связанных контуров, выполняемых с индуктивной или емкостной связью (рис. 23). Эти контуры выделяют полезный сигнал, частота которого находится в полосе частот зоны прозрачности фильтра, образованного ими. Такие усилители характеризуются высокой избирательностью (способностью отделить полезный сигнал от помех) и высоким коэффициентом усиления, так как параллельный контур при резонансе обладает большим сопротивлением, что способствует выделению напряжения, имеющего частоту, на которую настроен контур.

В таких устройствах (схемы на рис. 23) конденсаторы C_1 обеспечивают связь между контурами, т. е. передают энергию из первого контура во второй, а конденсаторы C_2 являются контурными и служат для получения резонанса в контурах. Коэффициент передачи зависит от значения емкости конденсатора C_1.

Конденсаторы в резонансных усилителях должны обладать высокой температурной стабильностью емкости, чтобы при изменении температуры не происходила существенная расстройка контуров. Поэтому в них используют конденсаторы с полистирольным, полипропиленовым, поликарбонатным диэлектриком, а также некоторые виды керамических конденсаторов со взаимно компенсирующей температурной зависимостью емкости.

В супергетеродинных приемниках радиоволн, широко применяемых в технике вещания, связи, навигации и т. д., необходима согласованная перестройка входных контуров, контуров усилителя колебаний высокой

частоты и гетеродина — вспомогательного маломощного генератора. В специальном устройстве (смесителе) эти колебания складываются и в результате биений преобразуются в сигнал промежуточной постоянной частоты, который усиливается в усилителе того же названия. Для осуществления этого с помощью конденсаторов переменной емкости упомянутые выше контуры перестраиваются одновременно так, чтобы разность частот колебаний гетеродина и принимаемых сигналов была постоянной и равной частоте, на которую настроен усилитель промежуточной частоты. Этим существенно упрощается задача получения большого усиления не только в случае многодиапазонных приемников, но и при приеме сигналов одной частоты. Конденсаторы для этих целей представляют собой блоки из двух и более секций. Емкость у этих секций регулируется изменением площади обкладок путем перемещения пластин ротора, расположенных на одной оси, изолированной от неподвижных статорных пластин.

Такие конденсаторы с воздушным или твердым диэлектриком применяются не только в усилителях, но и в генераторах с плавной регулировкой частоты, используемых, в частности, в качестве измерительных.

Кроме них для сопряжения контуров — уменьшения влияния неравномерности изменения емкости при перестройке частот гетеродина и высокочастотных контуров — в контур гетеродина включают конденсаторы постоянной емкости (последовательно с контуром и параллельно ему). Для точной настройки контуров усилителей используют подстроечные конденсаторы. Обычно это керамические конденсаторы с плавно регулируемой емкостью. В многокаскадных усилителях, имеющих большой коэффициент усиления, для предотвращения паразитного самовозбуждения в цепи питания включаются развязывающие *RC*-фильтры, содержащие конденсаторы, имеющие схему, показанную на рис. 18, *в*.

В усилителях с многоэлектродными лампами (тетродами, пентодами, гептодами и т. д.) для устранения возникновения на экранных сетках переменного потенциала, оказывающего мешающее действие, этот электрод «заземляют» по переменному току, включая между ним и общим полюсом устройства («землей») конденсатор относительно большой емкости.

Кроме ламповых усилителей конденсаторы как элементы колебательного контура используются в специальных видах усилителей (параметронах, диэлектрических усилителях и др.).

Конденсаторы в усилителях применяются также в составе специальных цепочек, корректирующих амплитудно-частотные и фазовые характеристики усилителей. На выходе усилителей мощности звуковых сигналов с помощью конденсаторов и фильтров с конденсаторами осуществляют частотное разделение сигналов высокой и низкой частот для воспроизведения звуков отдельными громкоговорителями, что улучшает качество звучания.

12. Конденсаторы в электрических фильтрах

Одно из первых применений электрических фильтров осуществлено в конце XIX века для одновременной передачи по одним проводам телеграфных и телефонных сигналов по предложению русского военного инженера Г. Г. Игнатьева. В настоящее время фильтры широко используются не только в устройствах проводной связи, но и в различной измерительной, радиоэлектронной аппаратуре, в электротехнических и электроэнергетических установках.

Их применяют для разделения сигналов различных частот, сглаживания пульсаций напряжения постоянного тока (см. пункт 9), улучшения формы переменного напряжения (для приближения ее к синусоидальной форме) и других целей, в частности подавления электромагнитных помех (см. пункт 13). С помощью фильтров устройствам автоматики, связи, управления придают определенные необходимые для правильного и эффективного функционирования частотные свойства.

Схемы фильтров разнообразны, однако по частотным свойствам они всегда могут быть отнесены к какой-то одной из следующих групп: фильтры низкой частоты, высокой частоты, заграждающие (режекторные) и полосовые.

У фильтров низкой частоты полоса пропускания (зона прозрачности) находится в области низких частот (область 1 на рис. 24, *а*). В этой зоне фильтр

практически без ослабления передает электрические сигналы с входа на выход. Выше частоты среза f_c фильтр низких частот начинает существенно ослаблять сигналы, вследствие чего напряжение U_2 на выходе фильтра становится значительно меньше напряжения U_1 на его входе.

В фильтре высокой частоты (рис. 24, *б*) полоса пропускания лежит выше частоты среза, т. е. он прозрачен для сигналов, частота которых больше f_c, тогда как сигналы с частотами ниже f_c он не пропускает.

Такие свойства фильтров обусловлены частотными зависимостями реактивных сопротивлений конденсаторов $\left(x_c - \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}\right)$ и катушек индуктивностей ($x_L = \omega L = 2\pi f L$), а также расположением этих элементов в схеме фильтра.

Заграждающие фильтры имеют полосу задерживания (зону непрозрачности), находящуюся между двумя частотами среза f_{c1} и f_{c2} (рис. 24, *г*), а полосы пропускания ниже и выше этих частот. Здесь конденсаторы являются элементами резонансных контуров. Последовательный LC-контур при резонансе напряжений представляет собой малое активное сопротивление, а параллельный LC-контур при резонансе токов — большое.

Полосовой фильтр противоположен по частотным свойствам заграждающему. В простейшем случае полосовой фильтр может быть образован последовательно включенными фильтрами высокой и низкой частоты. Однако лучшей избирательностью обладают полосовые фильтры, состоящие из резонансных контуров, например по схеме рис. 24, *в*.

Увеличение избирательности и затухания в полосе задерживания достигается с помощью кварцевых фильтров, основой которых является кварцевый резонатор. Кварцевый резонатор — это пластина кварца, на которую нанесены обкладки, по конструкции он подобен обычному плоскому конденсатору.

При определенных частотах в кварцевом резонаторе возникают электромеханические резонансы. Добротность такой колебательной системы очень велика, благодаря чему кварцевые фильтры обладают узкой полосой пропускания и высокой избирательностью. Сами кварцевые резонаторы характеризуются малыми раз-

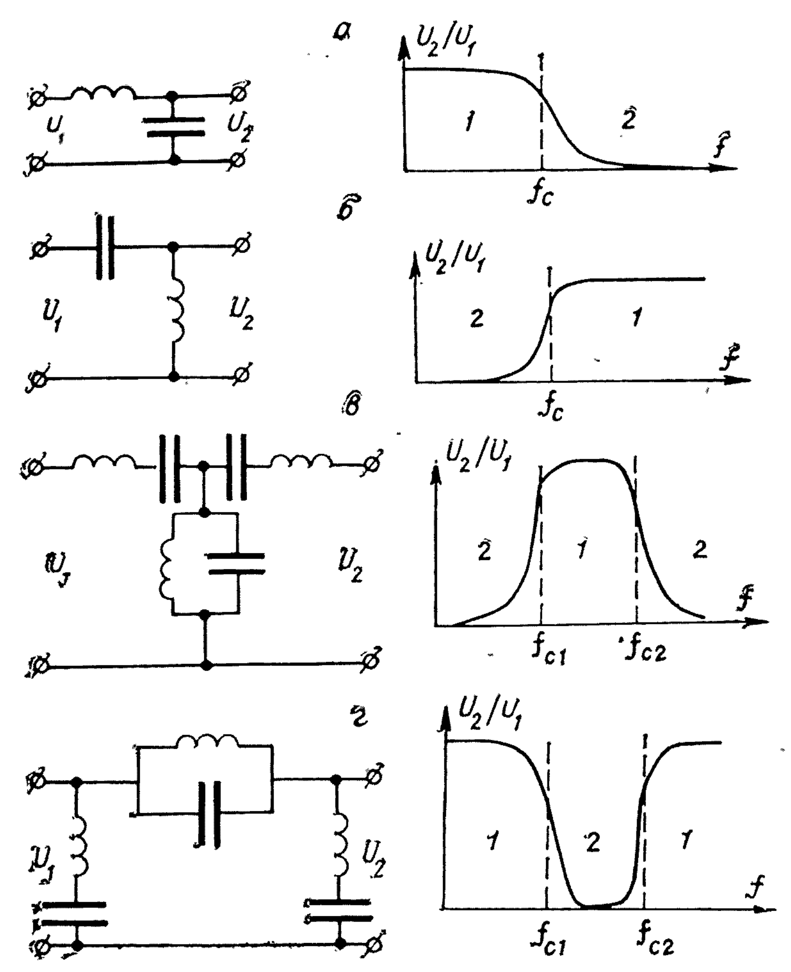


Рис. 24. Примеры схем фильтров низких (*а*), высоких (*б*) частот, полосового (*в*), режекторного (*г*) и их полосы пропускания (*1*) и задержания (*2*)

мерами и стабильностью характеристик. Изменением размеров кварцевой пластинки достигаются разные частоты резонанса, а комбинацией кварцевых резонаторов — различные виды фильтров.

Существует еще множество других схем фильтров, в том числе состоящих только из резисторов и конденсаторов. В качестве *RC*-фильтров низких и высоких

частот могут работать цепочки, схемы которых показаны на рис. 18. На основе резисторов и конденсаторов строятся и более сложные фильтры, имеющие свойства полосовых и заграждающих фильтров.

RC-Фильтры на звуковых частотах имеют малые габариты, массу и стоимость, однако их частотные свойства значительно хуже, чем у фильтров, построенных только из реактивных (*LC*) элементов.

Для улучшения избирательности и уменьшения ослабления сигналов *RC*-фильтры часто используются в комбинации с электронными усилителями (активные *RC*-фильтры).

Повышение фильтрующих свойств *LC*- и *RC*-фильтров достигается каскадным включением звеньев фильтров (многозвенные фильтры), а также усложнением их схем. Одним из примеров широкого применения полосовых фильтров на основе параллельных контуров с магнитной или емкостной (см. рис. 23) связью является использование их в усилителях промежуточной частоты супергетеродинных приемников радиосигналов.

Фильтры используют не только в маломощных, но и в силовых цепях. В пункте 9 было упомянуто о фильтрах, сглаживающих пульсации выпрямленного напряжения. В этом случае постоянный ток, который можно рассматривать как переменный с нулевой частотой, находится в полосе пропускания, а переменная составляющая должна находиться в полосе задержания, т. е. сглаживающие фильтры — это фильтры низкой частоты. В этих фильтрах конденсаторы проявляют оба свойства: они являются и накопителями, которые отдают свою энергию в определенные интервалы времени в нагрузку; и частотно-зависимыми реактивными сопротивлениями, помогающими снизить переменную составляющую напряжения на нагрузке.

Кроме простейших фильтров низкой частоты (однозвенных или многозвенных) применяются также резонансные сглаживающие фильтры с параллельным и последовательным (рис. 25) колебательными контурами, настроенными на частоту основной гармоники переменной составляющей пульсирующего напряжения.

Благодаря резонансным свойствам контуров такие фильтры обеспечивают сильное подавление основной гармоники, однако ослабление более высокочастотных

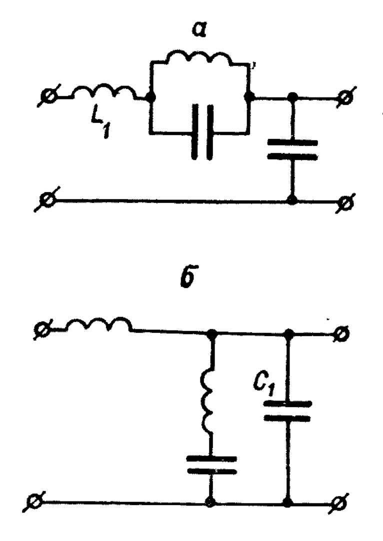


Рис. 25. Сглаживающие фильтры с параллельным (*а*) и последовательным (*б*) резонансными контурами

составляющих напряжения и тока у них менее эффективное, чем у широкополосных фильтров низких частот. Для устранения этого недостатка включают дополнительные элементы — дроссели L_1 и конденсаторы C_1 (рис. 25).

Резонансные сглаживающие фильтры, кроме этого, чувствительны к изменениям частоты напряжения, а также требуют индивидуальной настройки.

При высоких требованиях к сглаживанию пульсаций, при очень низкой их частоте, а также необходимости получения минимальных габаритов фильтрующего звена применяют так называемые электронные фильтры. В них роль последовательного элемента фильтра играет электронная лампа (обычно пентод) или полупроводниковый триод. Сопротивление этих приборов постоянному току значительно ниже, чем переменному, благодаря чему достигается высокое сглаживающее действие фильтров при сравнительно высоком КПД. Еще более высокое сглаживание обеспечивают электронные фильтры с отрицательной обратной связью, у которых сопротивление активного элемента (лампы или полупроводникового триода) изменяется с частотой переменной составляющей пульсирующего напряжения. Для этого с помощью фильтра высокой частоты эта составляющая подается на управляющий электрод усилительного прибора.

Электронные сглаживающие фильтры с отрицательной обратной связью обладают низким выходным сопротивлением, что важно при питании потребителей с колеблющимся током нагрузки.

В последние годы получили распространение активные сглаживающие фильтры в достаточно мощных вы-

прямительных установках (до сотен киловатт) с высокими требованиями к сглаживанию пульсаций напряження, обусловленными как пульсирующим характером выпрямленного напряжения, так и измененнями тока нагрузки.

Принцип его действия основан на том, что переменная составляющая пульсирующего напряжения подается на мощный усилитель, выход которого (обычно это вторичная обмотка трансформатора) включен последовательно в цепь питания. Благодаря подбору соответствующей фазы и коэффициента усиления переменное напряжение на выходе усилителя вычитается из пульсаций в цепи питания, что приводит к резкому уменьшению последних.

Мощные фильтры переменного тока применяются в энергетических системах для улучшения формы питающего напряжения в местах, где к сети подключены мощные вентильные преобразователи. Такие преобразователи потребляют из питающей сети ток, содержащий кроме основной ряд высших гармоник. Источниками высших гармоник являются также трансформаторы и реакторы с магнитными сердечниками.

Высшие гармонические составляющие, протекая через генераторы, трансформаторы и провода, вызывают дополнительные потери энергии и искажают форму напряжения питающей сети. Это вредно отражается на работе электрических двигателей, конденсаторов, компенсирующих реактивную мощность, устройств автоматики, защиты и т. д.

Кроме этого, высшие гармоники тока, лежащие в области тональных частот, распространяясь по питающей сети, вызывают помехи в каналах связи. Впервые с этим столкнулись в 40-х годах XX-го века при широком внедрении электрифицированного железнодорожного транспорта, и в последнее время эта проблема становится все более острой. Одним из неприятных явлений, обусловленных высшими гармониками токов и напряжений в энергетических сетях, может быть возникновение резонансов на частотах одной или нескольких гармоник, при которых силовое оборудование, в том числе и конденсаторы, перегружается по току и напряжению.

Для устранения вредного влияния высших гармоник

непосредственно у их источника устанавливают фильтры. Обычно они представляют собой последовательные LC-контуры, настроенные на частоты наиболее мощных высших гармоник тока и включенные параллельно устройству, являющемуся их источником, например мощному выпрямителю. Такие контуры имеют очень малые сопротивления для токов резонансных частот, вследствие чего эти токи протекают через фильтр, не попадая в сеть. В комбинации с такими фильтрами применяются и широкополосные фильтры, которые «отсасывают» токи более высокочастотных гармоник.

Аналогичные фильтры используются для получения синусоидального напряжения в автономных инверторах тока. Другие разновидности фильтров, например полосовой фильтр или в виде параллельных контуров, включенных последовательно, применяются для получения такого напряжения на выходе автономных инверторов напряжения (см. пункт 8). Частота напряжения на выходе таких устройств должна быть стабильной, так как в противном случае фильтры не будут качественно выполнять свои функции.

Применяются электрические фильтры в энергетических системах и для выделения сигналов связи, телеуправления и телеизмерения, передаваемых по линиям электропередачи высокого напряжения. На рис. 26 показана упрощенная схема системы связи по проводам высоковольтных ЛЭП. Заградители *ЗГ* представляют собой параллельный LC-контур, резонансная частота

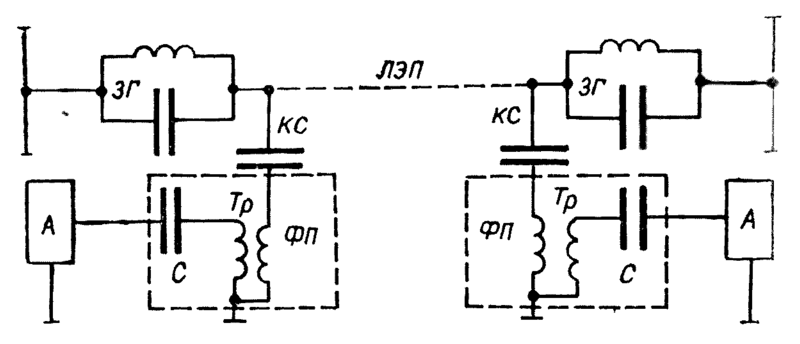


Рис. 26. Схема высокочастотной связи по проводам высоковольтных линий электропередач:

ЗГ — заградитель; *КС* — конденсатор связи; *ФП* — фильтр присоединения, *А* — аппаратура высокочастотной связи

которого равна частоте несущих информацию высокочастотных токов.

Заградитель должен иметь малое сопротивление для силового тока промышленной частоты (50 Гц в СССР и 60 Гц в США и некоторых других капиталистических странах). Для высокочастотных токов он должен представлять большое сопротивление. Поэтому в ряде случаев в качестве заградителя может быть использован также одиночный реактор — сильноточная катушка индуктивности.

Конденсатор связи *КС*, емкость которого составляет тысячи пикофарад, напротив, имеет большое сопротивление для тока низкой частоты и малое — для высокочастотных токов. Таким образом, конденсатор связи служит разделительным элементом, задерживающим высокое напряжение низкой частоты и пропускающим слабые токи высокой частоты. Для обеспечения дополнительной безопасности и улучшения условий передачи и выделения высокочастотных сигналов служит фильтр присоединения, являющийся полосовым фильтром.

Высокочастотные токи почти без ослабления трансформируются из первичной обмотки во вторичную трансформатора *Тр*. Конденсатор *С* образует с индуктивностями обмоток трансформатора *Тр* последовательный контур, настроенный на частоту несущих колебаний. К фильтрам присоединения на приемном и передающем пунктах подключается аппаратура *А*, содержащая передатчик и приемник несущих колебаний, модулированных по амплитуде сигналами информации.

Благодаря заградителям несущие колебания попадают в приемник, где они детектируются. Получаемые после детектирования сигналы первичной информации далее используются, например, для управления высоковольтными выключателями.

В сетях среднего напряжения подключение передатчиков часто осуществляется без конденсаторов связи, через понижающий силовой трансформатор. Однако и в таких системах используются фильтры для обеспечения максимальной передачи энергии высокочастотных сигналов в сеть.

Конденсаторы, используемые в системах связи по проводам высоковольтных ЛЭП, должны обладать

достаточно высокой стабильностью емкости, малой индуктивностью и высоким сопротивлением изоляции. К конденсаторам связи также предъявляются высокие требования по электрической прочности, так как на них воздействуют перенапряжения, возникающие в линиях при коммутациях, грозовых ударах и достигающие десятков и сотен тысяч вольт. Вместе с тем пробой таких конденсаторов представляет определенную угрозу безопасности обслуживающего персонала. В связи с этим конденсаторы связи выполняют в виде последовательно соединенных емкостных элементов (секций), имеющих большой запас по электрической прочности. Это обстоятельство, а также эксплуатация при высоких и сверхвысоких напряжениях на открытом воздухе обусловливают выполнение конденсаторов с ребристыми фарфоровыми корпусами максимальных размеров (их длина достигает полутора и более метров). При очень высоких напряжениях включают несколько конденсаторов связи последовательно.

Свойства фильтров разделять токи различных частот могут быть использованы для одновременной передачи по одним и тем же проводам постоянного и переменного тока высокого напряжения. На рис. 27 приведена принципиальная схема такой передачи. Фильтры $Ф_1$ пропускают только переменный ток и не пропускают постоянный (он задерживается последовательно включенным конденсатором). Фильтры $Ф_2$, наоборот, пропускают постоянный ток (он проходит через реакторы фильтров) и не пропускают переменный

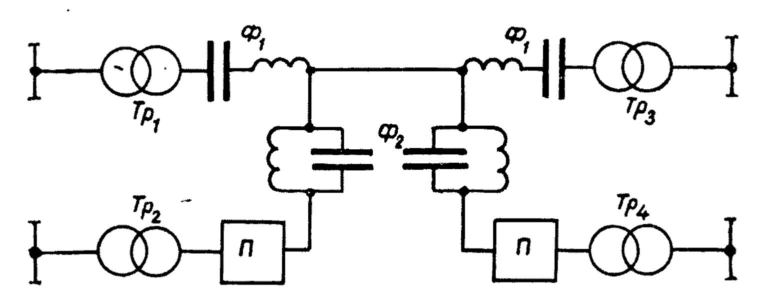


Рис. 27. Схема одновременной передачи электрической энергии постоянного и переменного тока: $П$ — преобразователь; $Ф_1$ — фильтр, пропускающий только переменный ток; $Ф_2$ — фильтр, пропускающий только постоянный ток

из-за большого сопротивления вследствие резонанса токов в параллельном контуре.

Такая система одновременной передачи энергии постоянным и переменным током повышает эффективность использования высоковольтных линий электропередачи, стоимость которых в энергетических системах очень велика. Однако перспективность применения подобных систем на практике оценивается конечным экономическим эффектом, поскольку для них требуются дополнительные дорогостоящие устройства (фильтры и преобразователи).

Виды конденсаторов, применяемых в электрических фильтрах, весьма разнообразны. В низковольтных сглаживающих фильтрах для выпрямителей низкой частоты наибольшее распространение получили конденсаторы с оксидным диэлектриком (оксидно-электролитические конденсаторы). В средне- и высокочастотных сглаживающих фильтрах меньшие габариты и лучшую фильтрацию обеспечивают металлопленочные конденсаторы. В высоковольтных сглаживающих фильтрах применяются преимущественно бумажные конденсаторы с жидкой пропиткой и керамические с твердым диэлектриком.

В частотных фильтрах вид конденсаторов определяется частотой, напряжением и требованиями к стабильности емкости. На низких частотах применявшиеся ранее бумажные конденсаторы вытесняются пленочными на основе таких диэлектриков, как лавсан, поликарбонат, полисульфон и др. На средних и высоких частотах в фильтрах широко применяют полистирольные, фторопластовые и керамические конденсаторы. Силовые энергетические фильтры строятся на основе конденсаторов с бумажным, бумажно-пленочным и пленочным диэлектриками с пропиткой жидким диэлектриком.

13. Подавление электромагнитных помех с помощью конденсаторов

Широкое использование электричества в промышленности, на транспорте, в быту, в различных областях техники и науки породило проблему электромагнитной совместимости и борьбы с электромагнитными помехами. Очень часто в непосредственной

близости друг к другу работают мощные энергетические установки и слаботочные электронные устройства связи, управления, регулирования и т. д. Разумеется, сильноточные устройства влияют на слаботочные, хотя сбои в работе последних часто отражаются на работе первых.

Электромагнитные помехи создаются не только силовыми установками, но и маломощными устройствами, как, например, бытовыми электроприборами, системами зажигания транспортных средств. Кроме непреднамеренных помех, к которым также относятся атмосферные помехи, созданы их источники, специально предназначенные для оказания мешающего действия приему радиосигналов, которые применяются в основном при военных действиях. Мощным источником импульсной электромагнитной помехи является также ядерный и термоядерный взрыв.

Что же такое электромагнитные помехи? Это электромагнитные волны различных частот и амплитуд. Они в зависимости от частоты колебаний и их источника могут распространяться по проводам (обычно это сравнительно низкочастотные колебания), а также в виде радиоволн, т. е. электромагнитных колебаний, распространяющихся в свободном окружающем пространстве.

Электромагнитные помехи не сказываются непосредственно на работе силовых установок, но, попадая в чувствительные устройства, такие, как радио- и телевизионные приемники, устройства связи, они накладываются на полезные сигналы, искажают их. Так как радио- и телевизионные приемники, приемники радиолокаторов преобразуют электромагнитные колебания в звук и световые сигналы, то помехи проявляют себя в виде треска, шума, полос и вспышек на экранах телевизоров, срывов синхронизации их разверток и т. д. Помехи оказывают мешающее действие не только на устройства связи, вещания, радиолокации, но и на работу вычислительных машин. В них электромагнитные помехи в виде электрических импульсов приводят к сбоям в работе, искажению информации и в результате к неправильным вычислениям.

Несколько иной, но интересный характер искажений информации в ячейках конденсаторных элементов

памяти ЭВМ, о которых речь шла в пункте 10, как недавно установлено зарубежными исследователями, может быть связан с космическими лучами, представляющими потоки высокоэнергетических частиц и жесткого электромагнитного излучения. При попадании таких лучей в микроминиатюрные конденсаторы они могут изменить их заряд и соответственно смысл информации.

Непосредственными источниками электромагнитных помех, как уже упоминалось, являются разнообразные электрические установки, работа которых сопровождается коммутациями тока. Это могут быть контактные устройства, например электрические выключатели, и бесконтактные полупроводниковые преобразователи и бесконтактная коммутационная аппаратура. Мощными источниками периодических электромагнитных помех являются коллекторные электрические машины-генераторы и двигатели, в которых электрический ток в обмотках якоря переключается с помощью механического коммутатора-коллектора. Это переключение сопровождается искрообразованием и возникновением электромагнитных помех, распространяющихся как по проводам, так и в виде радиоволн.

При включении высоковольтных линий электропередачи, участков электрической сети, электрических машин и трансформаторов возникают броски токов и затухающие электромагнитные волны.

Если электрические выключатели, реле и другие коллекторные коммутационные аппараты создают одиночные импульсные помехи, то коллекторные электрические машины создают периодические электромагнитные импульсы помех. Мощные периодические импульсные помехи, следующие с частотой коммутации вентилей, создают также полупроводниковые преобразователи (см. пункт 8).

Другим источником электромагнитных помех являются электросварочные аппараты. Быстрые изменения тока в электрической дуге порождают широкий спектр электромагнитных колебаний. На заре развития радиотехники явления возбуждения электромагнитных колебаний при искровом и дуговом разряде использовались в искровых и дуговых передатчиках радиоволн.

В них с помощью резонансных контуров из катушек индуктивности и конденсаторов выделялся и направлялся в антенну ток одной частоты, на которой велась передача телеграфных сигналов.

Электромагнитные помехи могут возникать также при работе высокочастотной медицинской аппаратуры, различных электротехнологических установок (электротермического и диэлектрического нагрева, плазменной технологии и т. д.).

Быстрые колебания потребляемого из сети тока, спектр которого содержит относительно низкочастотные составляющие (до десятков тысяч герц), приводят к появлению электромагнитных помех, распространяющихся в основном по проводам. Посредством магнитных и электрических полей эти помехи попадают в линии телефонной связи, вызывая шумы и трески, каналы телемеханики и телеизмерения, обусловливая появление ложных команд и ошибок в измерениях.

Кроме упоминавшихся внешних электромагнитных помех существуют помехи внутренние, возникающие в самой аппаратуре. Они могут быть очень малой мощности и вызываться флуктуациями тока в лампах, полупроводниках (дробовой шум), проводниках и резисторах (тепловой шум) и т. д. Эти помехи влияют на работу высокочувствительных устройств.

В устройствах с импульсным характером работы отдельных узлов или всей аппаратуры внутренние помехи могут быть достаточно мощными и обусловливать их неправильную работу из-за появления ложных импульсов вследствие взаимного влияния отдельных узлов аппаратуры друг на друга. В этом случае полезный сигнал в одной части устройства, попадая по цепям питания (кондуктивная паразитная связь) или по цепям паразитной индуктивной или емкостной связи в другую часть устройства, становится помехой в работе последней.

Электромагнитные помехи оказывают большое вредное влияние. Например, неисправный электробытовой прибор (пылесос, электробритва, кофемолка и т. д.) может сделать невозможным прием телевизионных и радиопередач в нескольких домах. Неисправная система зажигания автомобиля дает такой же эффект.

В свою очередь, нормально принимающие сигналы телевизор и радиоприемник могут быть источником паразитного излучения, мешающего приему радиоволн в других устройствах.

Поэтому излучаемые помехи не должны превышать определенные допустимые уровни. Величина допустимых электромагнитных помех нормируется для различных частот и устройств. Так как обычно уровень помех, создаваемых самим устройством, часто превышает допустимый, то для его ограничения используются дополнительные средства.

Наиболее эффективной и экономичной является борьба с электромагнитными помехами непосредственно в источнике их возникновения, а не в узлах и устройствах, на которые они влияют. На практике используют сочетание различных способов защиты от помех.

Этой цели, в частности, служат различные фильтры (см. пункт 12), препятствующие проникновению помех в питающую сеть. Виды и параметры фильтров, используемых для этого, разнообразны, так как имеется много различных по характеристикам источников помех и ограничивающих условий. Простейшим фильтром помех являются конденсаторы. Импульс тока помехи интегрируется им (см. пункт 10), вследствие чего амплитуда напряжения ее становится незначительной.

Помехи, имеющие более или менее стабильный спектр, фильтруются благодаря свойству конденсаторов уменьшать свое сопротивление с частотой.

На рис. 28, *а* показана одна из схем подавления помех, возникающих при работе маломощных коллекторных электродвигателей в бытовых электроприборах. Штриховой линией показан металлический кожух прибора, являющийся экраном для излучаемых двигателем электромагнитных помех. Через конденсатор C_3 замыкаются высокочастотные токи, возникающие при коммутациях коллекторного двигателя *ДВ*. Чем выше частота этих токов, тем меньше сопротивление конденсатора и тем большая часть токов протекает через конденсатор, не попадая в питающую сеть.

Конденсаторы C_1 и C_2 дополнительно фильтруют высокочастотные помехи, возникающие на проводах питающей сети.

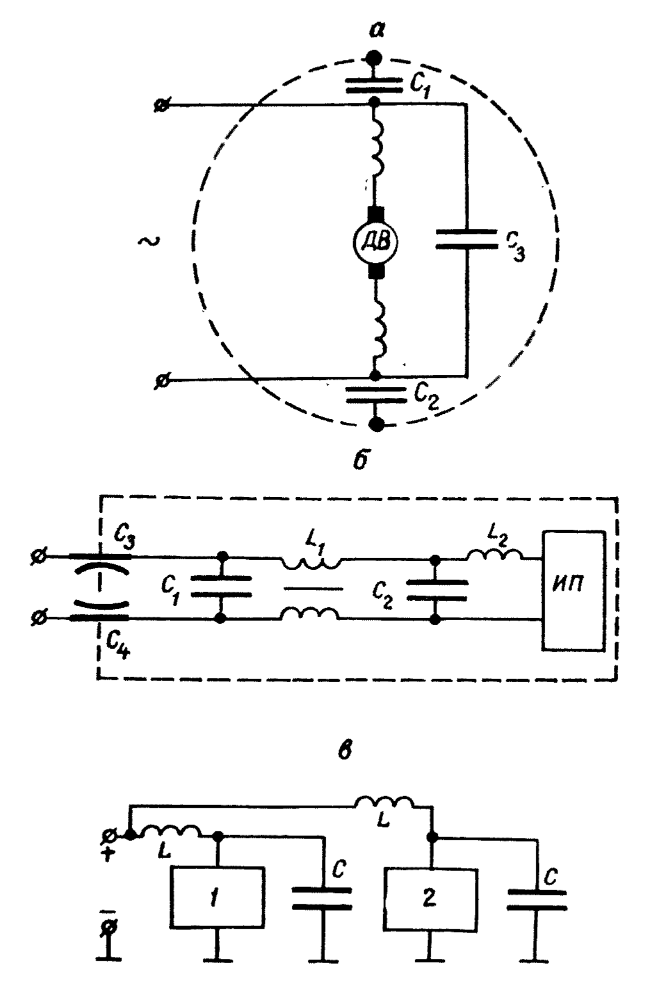


Рис. 28. Схема подавления электромагнитных помех, создаваемых коллекторным электродвигателем *ДВ* (*а*), схема подавления электромагнитных помех во вторичных источниках питания (*б*):
ИП — источник помех. Схема развязки по цепи питания блоков (*1*) и (*2*) электронных устройств (*в*)

Все эти конденсаторы имеют малые емкости (C_1 — порядка десятых долей, C_2 и C_3 — тысячных долей микрофарады) и малую длину соединительных выводов, чтобы их паразитная индуктивность не ослабляла фильтрующего действия.

Более эффективно подавление электромагнитных помех осуществляется с помощью индуктивно-емкостных фильтров. Схема, иллюстрирующая применение таких фильтров для подавления симметричных (фильтр L_1C_1) и асимметричных (фильтр L_2C_2) относительно земли помех, показана на рис. 28, *б*. Возрастающее с частотой сопротивления дросселей L_1 и L_2 и уменьшающееся сопротивление конденсаторов C_1 и C_2 согласованно способствуют замыканию высокочастотных токов помех в пределах объема, ограничиваемого защитным экраном (показан штриховой линией). Проходные конденсаторы C_3 и C_4, обладающие исключительно малой паразитной индуктивностью, дополнительно обеспечивают подавление симметричных и асимметричных помех.

Для защиты блоков электронных устройств от проникновения помех по цепям питания используют развязывающие *LC* или *RC*-цепочки в виде фильтров низкой частоты. Токи помех, возникающие в цепях питания блоков *1* и *2* (рис. 28, *в*), замыкаются через блокирующие конденсаторы *C*, не проходя через общий источник питания. Часто для более эффективной работы развязывающих цепочек параллельно включают два конденсатора. Один относительно большой емкости для замыкания низкочастотных токов помех, а другой, обычно керамический,— высокочастотных. Это связано с тем, что у конденсаторов малой емкости собственная индуктивность минимальна благодаря малым размерам. При монтаже с целью уменьшения индуктивности, ухудшающей подавление помех, соединительные провода стараются выполнять минимальной длины.

Когда это допустимо, параллельно входным зажимам электронных устройств включают конденсаторы небольшой емкости или даже фильтры низких и высоких частот или полосовые фильтры. Конденсатор оказывает интегрирующее действие, а с помощью фильтров сужается полоса пропускания этих устройств и тем самым повышается их помехозащищенность.

Кроме конденсаторов для подавления электромагнитных помех и защиты от них используются экранирование оборудования, бифилярная проводка проводников в экранированных оболочках, коаксиальные кабели и другие средства.

14. Деление напряжения и отбор энергии от высоковольтных линий электропередачи с помощью конденсаторов

Одной из функций конденсаторов, при которой используется их способность оказывать переменному току сопротивление, является деление переменного напряжения, т. е. получение с помощью конденсаторов части напряжения, изменяющегося во времени.

Деление напряжения осуществляется путем последовательного включения двух конденсаторов (рис. 29). При переменном напряжении через такую цепочку протекает ток, пропорциональный ее емкости, т. е. $i \equiv C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$. На нижнем плече делителя напряжения, т. е. на конденсаторе C_2, при прохождении этого тока возникает напряжение $U_2 = U_1 \frac{C_1}{C_1 + C_2}$.

Таким образом, коэффициент деления $K = \frac{C_1 + C_2}{C_1}$, т. е. для получения большого коэффициента деления конденсатор C_1 должен быть малой емкости по сравнению с конденсатором C_2.

Емкостные делители напряжения широко используются для измерения высоких и сверхвысоких переменных напряжений (десятки тысяч — миллионы вольт). Конденсатор C_2 в таких делителях обычно низковольтный, так как напряжение с него подается на измерительные приборы низкого напряжения (шлейфовые и электронные осциллографы). Конденсатор C_1 — высоковольтный, поскольку к нему приложено почти все высокое напряжение $\left(U_{C_1} = U_1 \frac{C_2}{C_1 + C_2}\right)$.

При измерениях быстро изменяющихся переменных напряжений конденсаторы и соединительные провода должны иметь малые индуктивности, чтобы свести к

минимуму их влияние на распределение напряжений в цепи. С целью снижения влияния делителей напряжения на процессы в измеряемой цепи (при подключении делителя ее параметры не должны существенно изменяться) емкость конденсатора C_1 очень мала (десятки и единицы пикофарады), тогда как емкость конденсатора C_2 обычно в сотни раз больше.

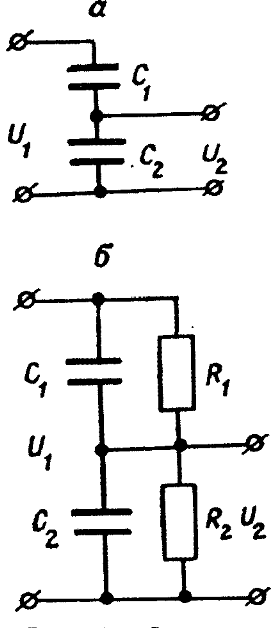


Рис. 29. Схемы емкостного (*а*) и емкостно-омического (*б*) делителей напряжения

Имеются конструкции, в которых конденсаторы C_1 и C_2 представляют единое устройство. В качестве диэлектрика в таких конструкциях используются воздух, стекло или вакуум. Для делителей сверхвысоких напряжений конденсатор C_1 верхнего плеча делителя имеет электроды с закругленными краями, обеспечивающими более равномерное распределение напряженности электрического поля. Один из электродов соединяется с объектом измерения, другой — с конденсатором C_2.

У емкостных делителей для очень высоких напряжений высоковольтная емкость C_1 образуется путем последовательного соединения большого числа конденсаторов. Паразитная индуктивность такой цепи оказывается уже достаточно значительной, в результате чего ограничивается максимальная частота измеряемого напряжения (обычно она составляет миллионы герц), а при измерении импульсных напряжений с крутыми фронтами возникают искажения формы импульсов из-за волновых процессов. Для уменьшения возникающих по этой причине погрешностей измерения последовательно с конденсаторами включаются резисторы, демпфирующие волновые колебания в цепи.

Емкостные делители напряжения используются не только для целей измерения напряжения, но и в элект-

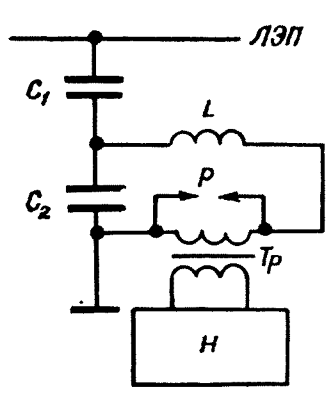


Рис. 30. Схема емкостного делителя напряжения для отбора энергии:

Н — нагрузка; *Тр* — понижающий трансформатор; *Р* — разрядник

роэнергетических системах. С их помощью к высоковольтным линиям электропередачи подключаются устройства защиты и измерительные приборы, а также осуществляют емкостный отбор энергии для питания потребителей напряжением 380/220 В на самой подстанции или других потребителей по трассе линии. При небольших мощностях такой способ подключения приборов и получения энергии низкого напряжения от шин подстанций напряжением более 110 кВ более дешевый, чем с помощью высоковольтных электромагнитных трансформаторов напряжения. Емкостный отбор энергии экономически целесообразно использовать при мощностях отбора энергии до сотен киловатт.

Опыт эксплуатации емкостных трансформаторов показал довольно высокую их надежность, что важно при электроснабжении.

Принципиальная схема емкостного отбора энергии от сети высокого напряжения, служащего этим целям, показана на рис. 30. Реальные устройства содержат элементы, повышающие надежность и безопасность работы (разрядники, защищающие конденсатор C_2 от перенапряжений, разъединители и заземляющий нож). Так как через делитель напряжения для отбора энергии проходит ток значительной мощности, а сопротивление нагрузки может изменяться, коэффициент деления емкостного делителя напряжения не может быть сделан очень большим (обычно он составляет 5—10 единиц). Поэтому в таких устройствах конденсатор C_2 также высоковольтный, его номинальное напряжение составляет 10—30 кВ, а для снижения напряжения до уровня, необходимого для электроснабжения и питания аппаратуры, защиты и измерения (обычно это

220—380 В), служит электромагнитный трансформатор *Тр*.

Для обеспечения прохождения через делитель энергии значительной мощности емкость конденсатора C_1 составляет несколько тысяч пикофарад. С помощью реактора *L* вторичный контур, образованный им, конденсатором C_2, а также трансформатором *Тр*, настраивается в резонанс (рис. 30). Это обеспечивает малую зависимость коэффициента деления напряжения, равного отношению высокого напряжения на шинах подстанции к напряжению на нагрузке, от величины последней.

Для устройств деления напряжения и отбора энергии от высоковольтной сети электротехнической промышленностью выпускаются специальные силовые конденсаторы с бумажным и бумажно-пленочным диэлектриком с жидкой пропиткой. Когда на подстанции необходимо иметь отбор энергии и систему высокочастотной связи (см. пункт 15), емкостный делитель используют и для отбора энергии, и для приема-передачи высокочастотных сигналов (конденсатор C_1 в делителе на рис. 30 играет роль конденсатора связи на рис. 26).

Конденсаторы в делителях напряжения используются не только в рассмотренных выше целях. Емкостные делители напряжения также широко применяются для принудительного равномерного распределения напряжения на последовательно соединенных элементах высоковольтных устройств.

В таких делителях напряжения емкости конденсаторов одинаковы, а их величина выбирается из условий обеспечения равномерного деления напряжения. Схема, иллюстрирующая применение конденсаторов для динамического выравнивания напряжений на электродах высоковольтного секционированного ионного диода — газотрона, показана на рис. 31. Резисторы *R* обеспечивают стекание зарядов, попадающих на секционирующие электроды, а также равномерность деления напряжения.

С помощью конденсаторов за счет их интегрирующего действия в приведенном устройстве достигается и снижение скорости нарастания обратного напряжения.

Принудительное равномерное распределение напряжения осуществляется с помощью конденсаторов в динамических режимах на последовательно включенных полупроводниковых вентилях мощных высоковольтных преобразовательных установок, а также в высоковольтных воздушных выключателях. Конструкция последних включает несколько разрывных промежутков, поэтому для успешного отключения высокого напряжения (для предупреждения повторного зажигания дуги) необходимо его равномерное распределение на этих промежутках, что достигается подключением параллельно к ним конденсаторов, имеющих одинаковые емкости,— порядка тысячи пикофарад. Эти конденсаторы укрепляются непосредственно на выключателях. Аналогичные делители используются в другом высоковольтном оборудовании. В отсутствие емкостных делителей динамическое распределение напряжений определялось бы паразитными емкостями элементов конструкций между собой и на землю, которые обычно не одинаковы, что приводило бы к пробоям изоляции перегруженных по напряжению участков.

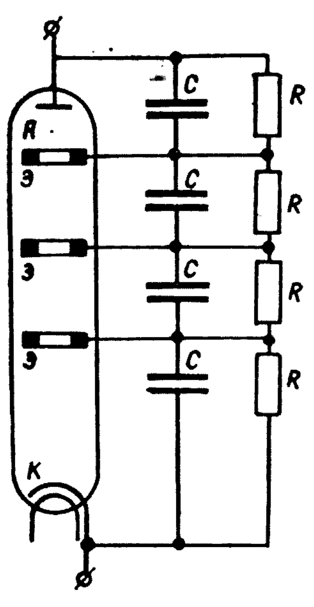


Рис. 31. Схема многоступенчатого емкостно-омического делителя напряжения:

А — анод; *Э* — секционирующие электроды; *К* — катод

Для обеспечения равномерного распределения напряжения емкости конденсаторов делителей должны быть примерно на порядок больше паразитных емкостей.

Делители напряжения из двух последовательно соединенных конденсаторов одинаковой емкости используются в различных преобразовательных и других устройствах для образования искусственной средней точки источника питания для переменного тока. Ре-

зистивный делитель напряжения, к нижнему плечу которого подключен накопительный конденсатор, позволяет получать импульсы энергии на необходимом уровне напряжения от нерегулируемых источников постоянного тока.

15. Конденсаторы — балластные сопротивления

Конденсаторы как элементы, обладающие реактивным сопротивлением, часто используются для ограничения тока в цепи, т. е. служат балластом. Если сопротивление конденсатора, включенного последовательно с остальными элементами, существенно больше сопротивления этих элементов, то ток в цепи определяется в основном реактивным сопротивлением конденсатора $\left(I \approx \frac{U}{\omega C}\right)$. В этом отношении конденсатор верхнего плеча высоковольтных делителей напряжения (см. пункт 14) также может рассматриваться как балластное сопротивление.

Схема, содержащая конденсатор для ограничения тока в цепи ламп накаливания (рис. 32, *а*), может быть применена при питании ламп в подъездах и лестничных клетках домов, а также для ночных маломощных светильников.

Достоинство конденсаторов как балластных сопротивлений в отличие от катушек индуктивностей и особенно резисторов — это малые потери энергии. На низкой частоте мощность диэлектрических потерь в конденсаторах составляет сотые и тысячные доли мощности энергии, потребляемой нагрузкой. Недостаток емкостного балласта в том, что при включении такой цепи имеет место бросок зарядного тока конденсаторов, который может привести к перегоранию ламп. С емкостным балластом обычно используются лампы накаливания на пониженные напряжения, т. е. с более толстой нитью и поэтому более устойчивой к действию толчков тока. Кроме этого, перегорание лампы не приведет к аварийной ситуации для конденсатора, так как он отключится от сети этим своеобразным предохранителем.

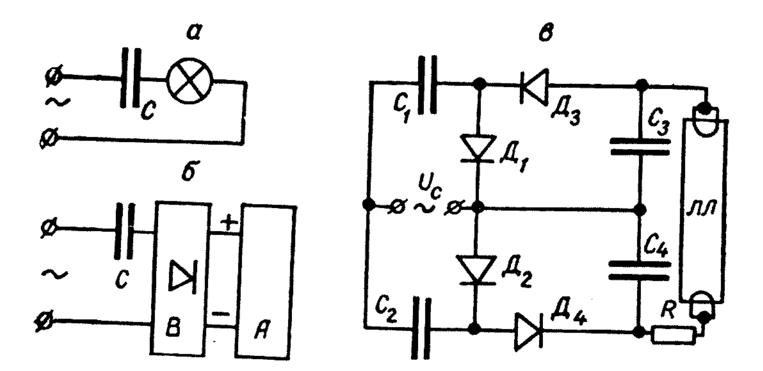


Рис. 32. Схемы, иллюстрирующие применение конденсаторов в качестве балластных сопротивлений:

а — схема питания лампы накаливания; *б* — схема ограничения тока зарядки аккумуляторов *А* с помощью конденсатора *С*; *в* — схема диодно-емкостного умножителя напряжения для питания люминесцентной лампы *ЛЛ* с перегоревшими нитями накала или потерявшими эмиссионную способность; *В* — выпрямитель

В качестве балластного реактивного сопротивления конденсаторы используются в маломощных выпрямительных устройствах для зарядки аккумуляторов и электрохимических батарей (рис. 32, *б*) (см., например, книгу С. П. Фурсова и В. А. Орлова «Источники тока в радиолюбительской практике». Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1979. 111 с.). В таких устройствах отпадает необходимость в понижающем трансформаторе, и они получаются более легкими и компактными, хотя и требуют большей осторожности в эксплуатации.

В ряде устройств конденсаторы на различных этапах работы выполняют различные функции. В качестве примера ниже рассмотрена работа учетверителя напряжения (рис. 32, *в*), позволяющего успешно эксплуатировать люминесцентные лампы с перегоревшими или потерявшими эмиссионную способность нитями накала.

При включении напряжения питающей сети конденсатор C_1 через диод $Д_1$ заряжается почти до амплитудного значения этого напряжения ($\sqrt{2}\ U_c$, т. е. около 310 В при $U_c=220$ В). В следующую половину периода под действием суммы напряжения сети и напряжения на конденсаторе C_1 через диод $Д_3$ заряжается конденсатор C_3. Амплитуда напряжения на этом конденсаторе около $2\sqrt{2}\ U_c$. В эту же половину периода через

диод $Д_2$ происходит зарядка конденсатора C_2, в следующий полупериод через диод $Д_4$ до напряжения $2\sqrt{2}U_c$ заряжается конденсатор C_4. В результате того, что конденсаторы C_4 и C_3 включены последовательно и напряжения на них суммируются, напряжение, приложенное к *ЛЛ*, составляет $4\sqrt{2}U_c$. Практически из-за колебательного характера зарядки конденсаторов (ведь сеть как источник обладает индуктивным внутренним сопротивлением) напряжение оказывается еще более высоким. Этого напряжения достаточно, чтобы вызвать ударную ионизацию газа в лампе.

После возникновения ионизации (лампа при этом начинает проводить ток и испускать свет) конденсаторы C_1 и C_2 работают как балластные сопротивления, ограничивающие ток в лампе и обеспечивающие устойчивый газовый разряд. Этой же цели служит резистор R. Через лампу при этом проходят однополярные волны тока по цепи сеть—диод $Д_2$—диод $Д_4$—резистор R—лампа—диод $Д_3$—конденсатор C_1 — сеть для одной половины периода напряжения и по цепи сеть—конденсатор C_2—диод $Д_4$—резистор R—лампа—диод $Д_3$—диод $Д_1$—сеть для другой половины периода напряжения.

Емкости конденсаторов C_1 и C_2 одинаковы и составляют в зависимости от мощности люминесцентной лампы соответственно от единиц до десятков микрофарад. Емкость конденсаторов C_3 и C_4 существенно меньше — несколько тысяч пикофарад.

16. Конденсаторы в индуктивно-емкостных преобразователях

Ряд достаточно мощных потребителей электрической энергии требует для питания стабильный по значению постоянный или переменный ток. К таким потребителям относятся некоторые электротехнологические устройства (плазматроны постоянного и переменного тока, дуговые сталеплавильные печи, электролизные ванны и др.), устройства зарядки аккумуляторов, накопительных конденсаторов и т. д.

Для получения тока, не зависящего от сопротивления нагрузки, в последнее время широко применяются

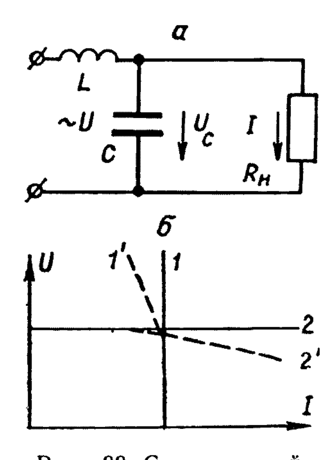


Рис. 33. Схема простейшего индуктивно-емкостного преобразователя источника напряжения в источник тока (*а*) и внешние характеристики (*б*) идеальных (*1*, *2*) и реальных (*1'*, *2'*) источников тока (*1*) и напряжения (*2*)

индуктивно-емкостные преобразователи. Они осуществляют преобразование источников напряжения в источники тока и наоборот. Идеальный источник тока обладает бесконечно большим внутренним сопротивлением, тогда как в идеальном источнике напряжения оно отсутствует. Поэтому в источниках тока и напряжения от сопротивления нагрузки оказываются независящими соответственно ток или напряжение. Зависимости напряжения на нагрузке от тока источников энергии (внешние характеристики) приведены на рис. 33, *б*.

В качестве простейшего индуктивно-емкостного преобразователя может быть использован последовательный контур в режиме резонанса, если его зажимы подключить к источнику напряжения, а нагрузку — параллельно конденсатору *C* (рис. 33, *а*).

При очень малых сопротивлениях нагрузки, вплоть до нулевого значения (режим короткого замыкания), ток в цепи будет определяться в основном реактивным сопротивлением катушки индуктивности *L*. При больших сопротивлениях нагрузки напряжение на конденсаторе *C* будет возрастать в связи с увеличивающейся добротностью контура ($U_c = U \cdot Q$, где $Q = \omega C R_н$). Благодаря росту этого напряжения ток в сопротивлении нагрузки будет неизменным. Теоретически такая ситуация должна наблюдаться при изменении сопротивления нагрузки от нуля до бесконечности, т. е. от режима короткого замыкания до холостого хода.

Разумеется, практически максимальное сопротивление нагрузки ограничено предельно допустимым напряжением на реактивных элементах преобразователя (реакторе *L* и конденсаторе *C*). Поэтому в отличие от источников напряжения, для которых из-за больших

токов опасен режим короткого замыкания, для индуктивно-емкостных преобразователей, служащих для получения неизменного тока, аварийным является режим холостого хода — отсутствие нагрузки.

На практике в индуктивно-емкостных преобразователях (ИЕП) из-за паразитных активных сопротивлений катушки индуктивности L и конденсатора C внешняя характеристика отличается от идеальной (рис. 33, *б*).

Рассмотренное выше устройство работает как ИЕП, если нагрузка имеет активный характер, например в виде резистора или выпрямителя (см. рис. 17). Если же нагрузка имеет индуктивный или емкостный характер, такое устройство в значительной мере теряет свойство преобразовывать источник напряжения в источник тока, так как при изменениях таких нагрузок происходит расстройка контура (отклонение частоты его резонанса от частоты питающего напряжения), из-за чего напряжение на конденсаторе падает. Поэтому применяемые на практике индуктивно-емкостные преобразователи имеют более сложные схемы. Некоторые варианты схем приведены на рис. 34. На рис. 34, *а* изогнутые стрелки и буква M обозначают магнитную связь между катушками индуктивности L. Трехфазные преобразователи, питающие трехфазную нагрузку, состоят из трех однофазных преобразователей либо имеют специальные, более сложные схемы.

Для получения неизменного по величине постоянного тока к выходным зажимам таких преобразовате-

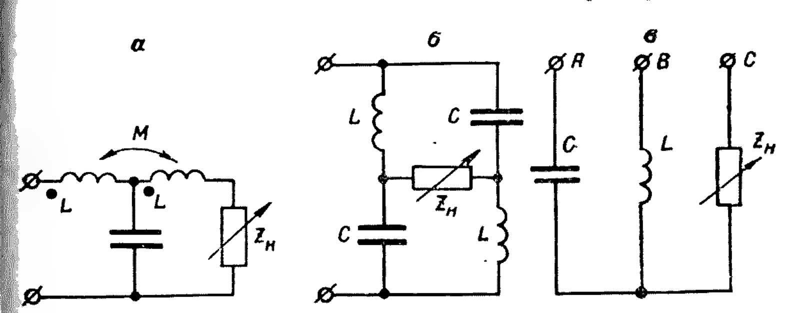


Рис. 34. Схемы некоторых однофазных индуктивно-емкостных преобразователей, питающихся от однофазной сети (*а*, *б*) и от трехфазной (*в*)

лей подключается выпрямитель. Часто для согласования нагрузки с преобразователем между ними включается трансформатор.

Индуктивно-емкостные преобразователи являются обратимыми устройствами, они позволяют получать не только стабильный ток из стабильного напряжения, но также осуществлять обратное преобразование. Преобразователи рассмотренного вида имеют высокий КПД, достигающий 90—95%. Однако суммарная мощность элементов таких устройств (различная для разных схем) значительно больше мощности нагрузки. Кроме этого, большинство их чувствительно к изменениям частоты питающей сети. Поэтому в настоящее время продолжаются интенсивные исследования в направлении устранения этих недостатков.

На практике довольно часто возникает необходимость стабилизации напряжения на иагрузке, питающейся от сети переменного тока. Из-за различных причин, в том числе изменяющегося во времени потребления энергии, сетевое напряжение колеблется в определенном пределе, составляющем от 5 до 10, а в неблагоприятных случаях даже 20% и более.

Вместе с тем ряд устройств, в основном электронная аппаратура (вычислительные машины, телевизионная аппаратура, некоторые измерительные приборы и т. д.), требуют для своего питания напряжение, отклонения которого от номинального не превышали бы определенного значения (единицы и доли единиц процентов). Даже тогда, когда в источниках питания этих устройств содержатся параметрические электронные стабилизаторы, для их нормального функционирования необходимо, чтобы колебания питающего переменного напряжеиия не превосходили допустимых пределов.

С этой целью питание таких устройств производят не непосредственно от сети переменного тока, а через стабилизаторы напряжения. Одна из схем феррорезонансного стабилизатора, состоящего из дросселя $Др_1$ и параллельного контура, образованного конденсатором C и дросселем $Др_2$, приведена на рис. 35, *а*. Дроссели здесь представляют собой катушки индуктивности с ферромагнитными сердечниками. Одиако $Др_1$ проектируется таким, чтобы его магнитная система

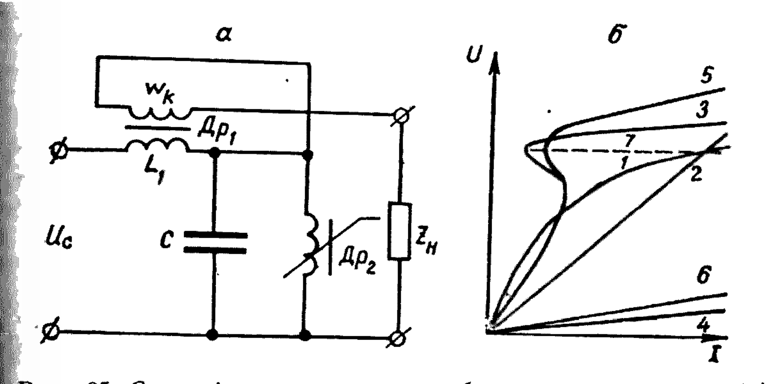


Рис. 35. Схема феррорезонансного стабилизатора напряжения (*а*) и вольт-амперные характеристики элементов и устройства (*б*):

1 — дросселя $Др_2$; 2 — конденсатора *С*; 3 — параллельного феррорезонансного контура; 4 — линейного дросселя $Др_1$; 5 — результирующая вольт-амперная характеристика линейного дросселя $Др_1$ и феррорезонансного контура; 6 — зависимость напряжения от тока на компенсационной обмотке $W_к$; 7 — зависимость напряжения на выходных зажимах стабилизатора от тока нагрузки

была не насыщена, а сердечник дросселя $Др_2$ находился в состоянии магнитного насыщения.

Емкость конденсатора *С* определяется из условия существования в параллельном контуре режима, близкого к феррорезонансу токов.

Ток, протекающий по дросселю $Др_1$, состоит из тока нагрузки и тока параллельного контура. С увеличением напряжения в питающей сети (U_c на рис. 35, *а*) увеличивается в основном вторая составляющая суммарного тока, так как зависимость тока в дросселе $Др_2$ от напряжения на нем очень сильная. Это приводит к увеличению падения напряжения на линейном дросселе $Др_1$. При понижении напряжения в питающей сети картина обратная. Поэтому при довольно значительных колебаниях напряжения питающей сети напряжение на феррорезонансном контуре изменяется несущественно. Для лучшей стабилизации напряжения выходные зажимы подключены не непосредственно к параллельному контуру, а к компенсационной обмотке дросселя $Др_1$.

Стабилизатор напряжения такого вида реагирует не только на колебания сетевого напряжения, но и на изменения тока нагрузки. Действительно, если ток нагрузки по какой-либо причине уменьшится, то

уменьшится и падение напряжения на линейном дросселе $Др_1$. Это, в свою очередь, приведет к увеличению напряжения на феррорезонансном контуре и росту его тока, что обусловит в значительной мере компенсацию изменения тока нагрузки. С увеличением тока нагрузки ток феррорезонансного контура уменьшается, благодаря чему напряжение на нагрузке изменяется незначительно.

Феррорезонансные стабилизаторы напряжения обладают относительно высокими энергетическими характеристиками: их КПД достигает 70—80%, а коэффициент мощности благодаря наличию конденсатора при активной нагрузке равен 0,8—0,9, т. е. они потребляют из сети относительно небольшую реактивную мощность. Реально достижимый коэффициент стабилизации, равный отношению отклонений напряжения на входных зажимах стабилизатора к отклонению напряжения на его выходе, составляет 20—30 единиц, что вполне достаточно для большинства практических случаев. Вместе с тем феррорезонансные ·стабилизаторы напряжения имеют такие недостатки, как чувствительность к изменениям частоты и несинусоидальность выходного напряжения, обусловленная высшими гармониками нелинейного дросселя. Специальными схемными мероприятиями (фильтрами, обратными связями) эти нежелательные свойства сводятся к минимуму.

Для стабилизации напряжения может быть использован также сегнеторезонансный контур, т. е. дроссель $Др_2$ (рис. 35, *а*) в сегнеторезонансном стабилизаторе должен быть линейным, а конденсатор *С* — нелинейным.

Если у конденсатора с увеличением напряжения емкость будет тоже увеличиваться, то процессы в стабилизаторе при изменениях напряжения сети и тока нагрузки будут такими же, как описанные выше. Именно этим качеством обладают вариконды — конденсаторы с сегнетоэлектриками. Такие стабилизаторы пока не получили распространения из-за относительно большой стоимости варикондов.

Разумеется, описанные выше устройства не единственная возможность получения стабильного напряжения. Известны и выпускаются различные ферромагнитные стабилизаторы с подмагничиванием, магнитным шунтом.

Промышленностью освоены и серийно выпускаются стабилизаторы напряжения с системами автоматического регулирования, позволяющими получить более высокие, чем у феррорезонансных стабилизаторов, коэффициенты стабилизации.

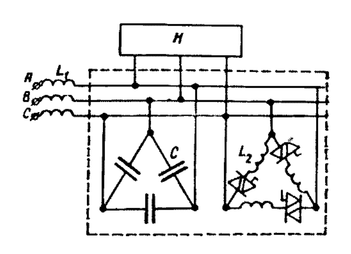


Рис. 36. Схема трехфазного стабилизатора переменного напряжения на базе тиристорного регулятора реактивной мощности

На рис. 36 приведена принципиальная схема силовых цепей тиристорного стабилизатора напряжения, базирующаяся на использовании вентильного регулятора реактивной мощности (на рис. 36 он обведен штриховой линией).

В таком стабилизаторе имеется система управления, которая может реагировать на изменение сетевого напряжения, напряжения на нагрузке, на ток нагрузки и т. д. Изменением фазы импульсов управления, подаваемых на симмисторы, регулируются моменты их включения относительно питающего напряжения. Это приводит к изменению тока, протекающего через реакторы L_2, и параллельного контура в целом. Последнее обусловливает изменение падения напряжения на последовательно включенных реакторах L_1, благодаря чему напряжение на нагрузке стабилизируется. Кроме хорошей стабилизации напряжения такие стабилизаторы обладают высоким быстродействием (оно составляет сотые доли секунды) в отличие от феррорезонансных стабилизаторов, для которых оно обычно равно десятым долям секунды.

Электроэнергетические сети часто питают мощные несимметричные трех- и однофазные нагрузки. К ним относятся, например, системы питания электрифицированного железнодорожного транспорта на переменном токе, различные электротехнологические установки, в частности электропечи. Несимметричные нагрузки отрицательно влияют на остальных потребителей электроэнергии и ухудшают технико-экономические характеристики системы электроснабжения. Например,

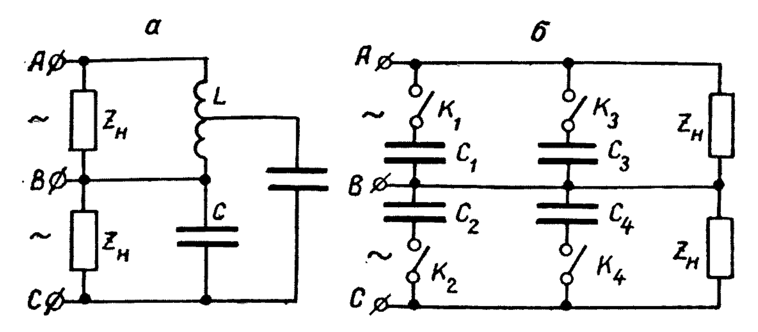


Рис. 37. Принципиальные схемы симметрирующих устройств, содержащих конденсаторы:
а — индуктивно-емкостное; *б* — емкостное

несимметрия трехфазной системы питающего напряжения обусловливает снижение вращающего момента электродвигателей, их дополнительный нагрев.

Поэтому одной из актуальных задач электротехники на современном этапе является создание устройств для симметрирования несимметричных нагрузок. Эта проблема обострилась в последние годы в связи с ростом мощности несимметричных нагрузок.

Одним из эффективных средств симметрирования являются устройства, использующие индуктивные и емкостные элементы, не вызывающие больших потерь энергии. На рис. 37 показаны принципиальные схемы, служащие для симметрирования несимметричных нагрузок: одна — на основе индуктивных и емкостных элементов, другая — на основе только емкостных элементов. Эффект симметрирования с помощью таких устройств достигается в результате дополнения несимметричной системы токов, потребляемых нагрузкой, несимметричной системой токов, потребляемых симметрирующим устройством.

Конечным результатом от суммирования этих токов является близкая к симметричной система суммарных потребляемых токов. Часто такие устройства служат не только для симметрирования нагрузки, но и для компенсации ее реактивной мощности, что достигается тоже с помощью конденсаторов (см. пункты 19 и 20).

17. Применение конденсаторов в фазовращателях

В устройствах управления, автоматического регулирования, электронных усилителях, генераторах часто возникает необходимость изменения (регулировки, коррекции и т. д.) фазы электрических сигналов. Это осуществляется с помощью фазосдвигающих цепей или фазовращателей. Для изменения фазы обычно используют свойства пассивных реактивных элементов — катушек индуктивностей и конденсаторов изменять фазу тока в цепи, в которую они включены.

Наибольшее распространение в электронной аппаратуре получили фазовращатели на основе емкостного элемента, так как они более компактны и легче, чем на осиове индуктивного элемента. В качестве простейших фазовращателей используются конденсаторы и *RC*-цепочки, показанные иа рис. 18.

Эти цепочки применяют как интегрирующие и дифференцирующие устройства и как фильтры низкой и высокой частот. Применение их для измеиения фазы синусоидального напряжения основано на том, что ток в такой цепи опережает на некоторый угол φ напряжение на входных зажимах $\left(\varphi=-\operatorname{arc\,tg}\frac{1}{\omega CR}\right)$, а фаза напряжения на выходных зажимах цепочки определяется углом φ и характером сопротивления, которое там включено. Если на выходе цепи включен конденсатор, то напряжение иа нем отстает по фазе от тока цепочки на угол, практически равный $\pi/2$, т. е. в этом случае выходное напряжение сдвинуто по фазе (в сторону отставания) относительно входного на угол $\psi=\pi/2+\varphi$.

Когда же выходиое напряжение снимается с резистора *R*, то оно, совпадая по фазе с током цепи, опережает входное напряжение на угол $-\varphi$. Поэтому для получения с помощью таких цепочек сдвига фаз, близкого к $\pi/2$, в первом случае необходим конденсатор, сопротивление которого на частоте питающего напряжения существенно меньше сопротивления резистора *R*. Например, если $f=50$ Гц и $R=1000$ Ом, то для получения угла сдвига фаз $\psi=80°$ ($\varphi=-10°$) необходим конденсатор емкостью $C\approx180$ мкФ.

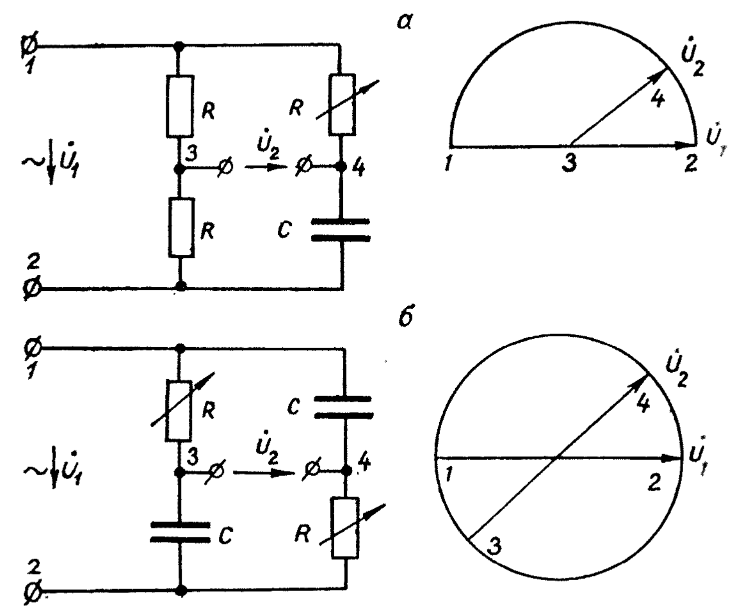


Рис. 38. Схемы мостовых фазовращателей с одним (*а*) и с двумя (*б*) конденсаторами и их круговые диаграммы

Так как в этом случае $R \gg \frac{1}{\omega C}$, то выходное напряжение $U_2 \approx \frac{U_1}{R\omega C}$ значительно меньше входного. Этот же недостаток присущ RC-цепочке, используемой для получения опережающего по фазе напряжения. В ней для получения угла сдвига фаз, близкого к $\pi/2$, конденсатор C должен иметь сопротивление значительно большее, чем резистор R. Поэтому такие простейшие фазовращатели обычно применяют для получения сдвигов фаз не более 70—80 электрических градусов. При необходимости получения больших углов сдвигов фаз используют устройства с операционными усилителями (см. рис. 18, *г*, *д*) или же мостовые схемы (рис. 38, *а*, *б*). Фазовращатели, выполненные по схемам рис. 38, обладают такими ценными свойствами, как неизменность выходного напряжения при регулировании угла сдвига фаз и возможность регулировки этого угла в пределах $0 - \pi$ электрических градусов.

На рис. 38 показаны круговые диаграммы для ненагруженных фазовращателей (геометрическое место точек концов вектора выходного напряжения при изменении сопротивления переменных резисторов от нуля до бесконечности). Потенциал точки *3* в устройстве по схеме рис. 38, *а* постоянный (резисторы *R* постоянного сопротивления образуют равноплечный делитель), тогда как потенциал точки *4* изменяется от потенциала точки *1* (при сопротивлении переменного резистора *R*, равном нулю) до потенциала точки *2* (при бесконечно большом сопротивлении *R*).

В фазосдвигающем устройстве по схеме рис. 38, *б* при $R=0$ потенциал точки *3* равен потенциалу точки *1*, а точки *4* — потенциалу точки *2*, т. е. сдвиг фаз между выходным и входным напряжениями отсутствует. При бесконечно больших сопротивлениях *R* потенциалы точек *3* и *4* равны соответственно потенциалам точек *2* и *1*. Конец вектора выходного напряжения в устройстве по схеме рис. 38, *а* с изменением сопротивления *R* от нуля до бесконечности перемещается по дуге полуокружности, тогда как в устройстве по схеме рис. 38, *б* концы этого вектора перемещаются по окружности, диаметром которой является вектор входного напряжения.

Для изменения знака угла фазового сдвига, т. е. при необходимости получения на выходе фазовращателя напряжения, отстающего по фазе от входного, в схемах рис. 38 конденсаторы *С* и переменные резисторы *R* необходимо поменять местами. Интересной для практики в таких устройствах является возможность получения двух напряжений, регулируемых по фазе относительно третьего и сдвинутых по отношению друг к другу на угол $\pi/2$. Для этого необходимо использовать напряжения между точками *1—4* и *4—2* в схеме рис. 38, *а* и между точками *1—4* и *4—2* или *1—3* и *3—2* в схеме рис. 38, *б*.

Регулировку сдвига фаз в фазовращателях рассмотренных видов можно осуществлять изменением сопротивления резисторов или емкости конденсаторов. Первый способ применяется чаще, так как резистор с переменным сопротивлением проще по конструкции, чем конденсатор переменной емкости. В фазовращателе по

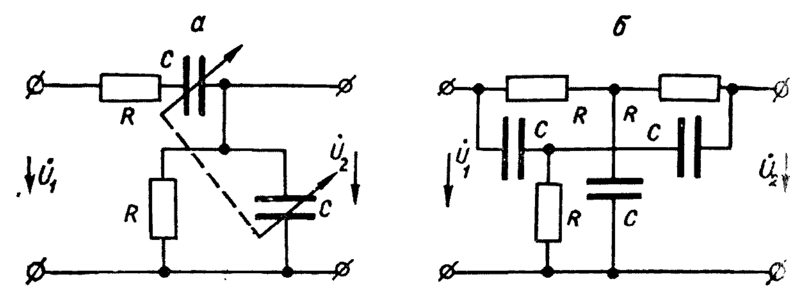


Рис. 39. Схемы фазовращателей, дающих нулевой (*а*) и π-радиан (*б*) фазовые сдвиги между напряжениями $\dot U_1$ и $\dot U_2$ на частоте $f = \frac{1}{2\pi RC}$

схеме рис. 38, *б* необходимо иметь два конденсатора, тогда как в другом фазовращателе (рис. 38, *а*) требуется только один конденсатор, однако его номинальное напряжение должно быть вдвое больше.

Более сложные схемы (интегродифференцирующие цепи) используют для получения угла сдвига фаз, разного по знаку в различных областях частот. Фазосдвигающие *RC*-цепи, дающие сдвиг фаз, равный 0 и π электрических градусов, используются в самовозбуждающихся электронных *RC*-генераторах, представляющих собой усилители, выход которых через фазовращатель соединен со входом. Такой фазовый сдвиг получают с помощью каскадного соединения звеньев простейших *RC*-цепочек (см. рис. 18) (цепочечные фазовращатели) либо с помощью специальных устройств, например, таких, схемы которых показаны на рис. 39.

Фазосдвигающие цепи выполняются не только на основе *RC*-, но и на основе *LC*- и *RLC*-элементов и применяются для корректировки фазовых и амплитудно-частотных характеристик электронных усилителей.

Фазосдвигающие свойства конденсаторов используются не только в слаботочной аппаратуре, но и в электроэнергетических системах и на промышленных предприятиях (см. гл. IV) для компенсации реактивной мощности потребителей электроэнергии, а также для осуществления пуска и работы асинхронных электродвигателей.

18. Применение конденсаторов для пуска и работы асинхронных электрических двигателей

В ряде бытовых электроприборов (холодильники, стиральные машины, магнитофоны, электропроигрыватели и др.), питающихся от однофазной сети переменного тока, электрический привод механизмов осуществляется с помощью так называемых однофазных конденсаторных асинхронных электрических двигателей с короткозамкнутым ротором. Они также широко применяются в исполнительных механизмах устройств автоматики и в некоторых регистрирующих приборах. Однофазные конденсаторные асинхронные электродвигатели большой мощности используются в электробурах для глубинного бурения.

Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором просты по конструкции, дешевы и надежны в эксплуатации. Вращающий момент в них возникает благодаря взаимодействию магнитных полей статора и ротора. Ротор таких машин конструктивно представляет собой барабан, собранный из листов стали с равномерно распределенными в пазах по образующим цилиндра (или под некоторым углом к ним) металлическими (обычно алюминиевыми) стержнями, составляющими обмотку, соединенными между собой на торцах барабана с помощью колец.

При подключении обмоток статора трехфазного асинхронного электродвигателя* к трехфазной сети переменного тока в нем возникает круговое вращающееся магнитное поле. По статору с частотой сети перемещается пространственная волна магнитного поля с близким к синусоиде распределением магнитной индукции. Такое поле является результатом сложения трех пульсирующих магнитных полей, образуемых обмотками статора, сдвинутых в пространстве под углом в 120° и питающихся сдвинутыми во времени на угол 2π/3 токами.

* Изобретателем трехфазного асинхронного электродвигателя (1889 г.) является русский инженер выдающийся ученый М. О. Доливо-Добровольский (1862—1919 гг.). Он создал также конструкцию трехфазного стержневого трансформатора (1891 г.).

Вращающееся магнитное поле статора, проходя через ротор, вызывает электродвижущие силы в обмотках ротора, которые, в свою очередь, приводят к протеканию токов в них. Этот процесс возможен только в случае, если скорость вращения ротора не равна скорости вращения магнитного поля статора. Такие электродвигатели в отличие от синхронных, в которых скорость вращения ротора в точности равна скорости вращения поля статора, работают с некоторым скольжением ротора $s=\frac{n_{ст}-n_{р}}{n_{ст}}$, где $n_{ст}$, $n_{р}$ — число оборотов в единицу времени поля статора и число оборотов ротора.

Разумеется, скорость вращения поля ротора относительно неподвижного статора и в асинхронном двигателе равна скорости вращения поля статора. Это происходит потому, что магнитное поле ротора не неподвижно относительно него, а перемещается по нему с частотой скольжения в направлении вращения ротора, поскольку поле статора возбуждает в роторе токи, полюсы магнитного поля которых «сцеплены» с полюсами поля статора. В однофазных асинхронных электродвигателях в отсутствие конденсаторов магнитное поле пульсирующее, так как питание обмоток осуществляется однофазным током, а для создания вращающего поля необходимо выполнение двух условий — сдвиг полей обмоток статора в пространстве и во времени. Пульсирующее поле, изменяющееся во времени по синусоидальному закону, можно рассматривать как результат сложения двух полей с одинаковой амплитудой, но вращающихся в противоположных направлениях. Возникающие в обмотке ротора ЭДС от этих двух полей уравновешивают друг друга, вследствие чего ток в ней не возникает и пусковой момент отсутствует. Конечно, если придать ротору вращение (в любом из двух направлений), то из-за разной скорости перемещения упомянутых двух составляющих пульсирующего поля относительно ротора в его обмотке возникнет ток и образуется поле, которое, взаимодействуя с полем статора, будет поддерживать вращение ротора. Причем ротор будет вращаться в направлении первоначального толчка.

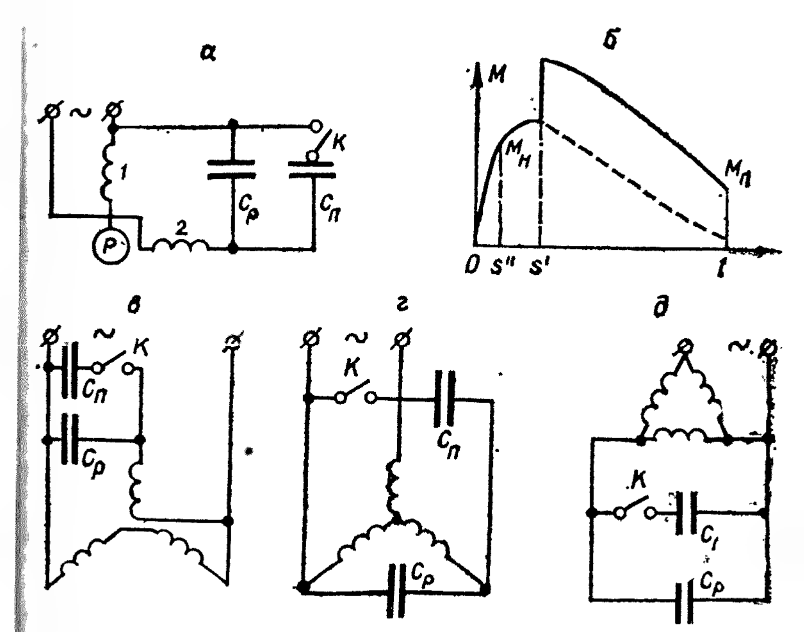


Рис. 40. Схемы включения конденсаторов в обмотки однофазных (*а*) и трехфазных (*в*—*д*) асинхронных электродвигателей и зависимость вращающего момента двигателя от скольжения ротора (*б*)

Для устранения указанного недостатка используются конденсаторы. Они включаются последовательно с одной из обмоток электродвигателя (рис. 40, *а*). Благодаря конденсатору ток в этой обмотке оказывается сдвинутым по фазе относительно тока в другой обмотке, чем обеспечивается временно́й сдвиг пульсирующих магнитных полей обмоток. Пространственный сдвиг полей достигается путем расположения обмоток на статоре с углом 90° между их осями. Сложение однофазных пульсирующих полей, сдвинутых во времени и в пространстве на угол $\pi/2$, дает результирующее вращающееся магнитное поле. Для получения максимального пускового и рабочего момента при минимальных потерях энергии вращающееся магнитное поле должно быть круговым, которое получается при одинаковых амплитудах магнитных полей обмоток. Если амплитуды не одинаковы, то получается эллиптическое вращающееся магнитное поле, которое может рассматриваться как результат сложения двух круговых полей разной амплитуды,

вращающихся в противоположные стороны, что снижает эффективность работы двигателя.

Характер вращающегося поля зависит не только от амплитуды полей обмоток, но и от сдвига фаз токов в них, который, в свою очередь, зависит от активных и реактивных сопротивлений электродвигателя, изменяющихся с изменением скорости вращения ротора.

Так как эти сопротивления различны при пуске и при номинальных оборотах, то для получения оптимального магнитного поля и соответственно необходимого момента на валу ротора емкость конденсатора при пуске и работе должна быть различной. С этой целью последовательно с обмоткой включают пусковой и рабочий конденсатор (рис. 40, *а*). Пусковой конденсатор, имеющий бóльшую по сравнению с рабочим конденсатором емкость, обеспечивает достаточный для пуска момент $M_п$ при заторможенном роторе. Скольжение s при этом равно единице (рис. 40, *б*). После разгона двигателя при некотором скольжении s' пусковой конденсатор отключается центробежным регулятором или другим устройством, контакт которого на рис. 40 обозначен буквой K, и в обмотке *2* остается включенным лишь рабочий конденсатор.

Установившееся скольжение s'' достигается при равенстве момента, развиваемого двигателем (сплошная линия на рис. 40, *б*), и момента сопротивления его нагрузки $M_н$. Штриховой линией на рис. 40, *б* показана зависимость вращающего момента на валу ротора электродвигателя от его скольжения при включенном только рабочем конденсаторе.

Если после пуска двигателя не отключать пусковой конденсатор, то из-за резонанса напряжений возможны резкое повышение напряжения на обмотке *2* и конденсаторе и пробой их изоляции или повреждение обмотки током большой величины.

Промышленность выпускает специальные конденсаторы, в которых емкости $C_п$ и $C_р$ конструктивно расположены в одном корпусе, что уменьшает габариты пускового устройства.

Поскольку процесс пуска двигателя протекает довольно быстро (доли — единицы секунд), часто в качестве пусковых используют дешевые и имеющие малые габариты неполярные конденсаторы с оксидным ди-

электриком. В качестве рабочих применяются конденсаторы, рассчитанные на длительную работу при переменном напряжении.

Для конденсаторных двигателей малой мощности (до десятков ватт) обычно используется один конденсатор неизменной емкости.

Для приближения поля к круговому в пусковом и рабочем режимах в таком случае последовательно с конденсатором иногда включают резистор соответствующей мощности.

Кроме рассмотренных вариантов конденсаторы включают также параллельно одной из обмоток, а вторую обмотку — последовательно с таким контуром. В этом случае требуемая емкость конденсаторов больше, чем при последовательном включении конденсаторов и обмотки (рис. 40, *а*).

В ряде случаев возникает необходимость работы трехфазных асинхронных электродвигателей от однофазной сети переменного тока. Для получения вращающегося магнитного поля в этих случаях обмотки двигателя соединяются соответствующим образом и к ним подключаются конденсаторы (рис. 40, *в—д*). Таким образом, такие двигатели используются как конденсаторные, хотя их полезная мощность при этом снижается на 20—30%.

Как в случае однофазного, так и трехфазного двигателя от места включения конденсатора зависит направление вращения ротора двигателя. Величины емкостей и их соотношение зависят от мощности электродвигателей и напряжения сети. Так, если конденсатор включить последовательно с обмоткой *1* (рис. 40, *а*), то ротор двигателя начнет вращаться в противоположную сторону по сравнению с направлением вращения при включении конденсатора в обмотку *2*. Значение емкости рабочего конденсатора (в мкФ по схеме включения на рис. 40, *в, г* обычно составляет $C_р = 2{,}75 \cdot 10^3 \frac{S}{U^2}$, а по схеме на рис. 40, *д* — $C_р = 4{,}8 \times 10^3 \frac{S}{U^2}$, где S — мощность двигателя в вольт-амперах, U — напряжение сети в вольтах).

Соотношение емкостей пускового и рабочего конденсаторов при использовании трехфазного двигателя в

качестве конденсаторного составляет $C_п/C_р \approx 3$—6. Напряжение на конденсаторе $C_п$ во время пуска меньше, чем на конденсаторе $C_р$ во время работы. Эти напряжения, как правило, отличаются от стандартных значений напряжения сети, поэтому для пуска и работы асинхронных электродвигателей от однофазной сети выпускаются специальные конденсаторы.

Конденсаторы в рассмотренных случаях выполняют функции фазосдвигающего элемента. Одновременно они компенсируют реактивную мощность, потребляемую двигателем из сети, что повышает результирующий коэффициент мощности.

19. Централизованная компенсация реактивной мощности в энергосистемах и на промышленных предприятиях с помощью конденсаторов

Большинство электрических нагрузок потребляет энергию, полная мощность которой S содержит как активную P, так и реактивную Q составляющую. Соответственно ток, потребляемый ими от источника энергии, может рассматриваться как состоящий из активной компоненты, совпадающей по фазе с напряжением, так и реактивной компоненты, сдвинутой относительно напряжения в сторону отставания (в случае индуктивного характера нагрузки) или опережения его (в случае емкостного характера нагрузки) (рис. 41, *б*).

Асинхронные электродвигатели, трансформаторы, электросварочные аппараты, индукторы (катушки, создающие магнитные поля), реакторы, дроссели, выпрямители — далеко не полный перечень устройств, полная мощность которых содержит реактивную составляющую. Передача энергии по линиям, имеющим индуктивный характер сопротивления, также сопровождается потреблением им реактивной мощности.

Соотношение между компонентами полной мощности зависит от фазового угла нагрузки $\varphi = \operatorname{arc\,tg} Q/P$. Чем больше угол φ, тем большую реактивную мощность имеет энергия, потребляемая нагрузкой от источника при фиксированном значении P (рис. 41, *в*). Активная мощность характеризует скорость преобразо-

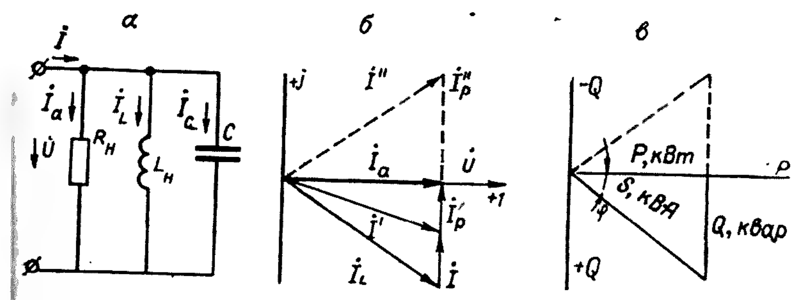


Рис. 41. Схема параллельного включения активно-индуктивной нагрузки $R_н$ и $L_н$ и компенсирующего конденсатора C ($а$). Векторная диаграмма токов ($б$): I_L — вектор индуктивной составляющей тока нагрузки; I_c — вектор тока конденсатора; I_p — реактивная компонента полного тока I, потребляемого из сети; $\dot U$ — вектор напряжения питающей сети. Треугольник мощностей ($в$). Режим перекомпенсации реактивной мощности показан штриховыми линиями

вания электрической энергии в различные виды — механическую, тепловую, химическую и другие, т. е. является полезной составляющей полной мощности. Реактивный ток в самих устройствах также необходим, так как образует магнитные поля в электрических машинах, трансформаторах и других устройствах, с помощью которых происходит преобразование энергии. Однако в системах электроснабжения эта компонента полного тока и мощности оказывает вредное действие. Она нагружает генераторы электрических станций, в результате чего снижается активная мощность энергии $P=\sqrt{S^2-Q^2}$ отдаваемой ими в сеть.

Снижается также допустимая активная мощность энергии, передаваемой по кабелям, через трансформаторы. Эти ограничения обусловлены нагревом элементов. Другими вредными последствиями протекания реактивных токов в системах электроснабжения являются: дополнительные потери энергии во всех элементах систем — генераторах, трансформаторах, линиях электропередачи; увеличение потерь напряжения на этих элементах и колебаний напряжения в системах; снижение устойчивости параллельно работающих энергетических систем и уменьшение пропускной способности дальних высоковольтных линий электропередачи. Все эти эффекты увеличивают затраты на электроснабжение и усложняют эксплуатацию электроэнергетических систем.

В частности, из-за потерь напряжения необходимо поддерживать более высокие напряжения на электрических станциях и в узлах энергосистем. Повышенные напряжения приводят к ускорению старения изоляции генераторов и трансформаторов, а также к дополнительному увеличению потерь энергии в них.

Реактивная мощность некоторых потребителей электрической энергии не является постоянной величиной. Она резко изменяется при пуске электродвигателей, работе некоторых электротехнологических установок. Изменения значения реактивной мощности крупных потребителей электрической энергии приводят к колебаниям напряжения в электрических сетях, особенно сильным вблизи этих потребителей. Колебания напряжения вредно отражаются на работе ряда приемников электроэнергии. Они, например, обусловливают изменение освещенности в помещениях, что утомляет глаза и оказывает раздражающее действие, а также приводят к неравномерности вращения роторов электрических двигателей и ухудшению работы технологических установок.

Полный ток электрической нагрузки можно уменьшить до значения активной компоненты путем компенсации его реактивной составляющей, располагая непосредственно у потребителя источник реактивной мощности. Если это осуществить у всех потребителей электроэнергии, то в электроэнергетических системах резко уменьшатся потоки реактивной мощности, снизятся потери энергии, появится возможность гененировать, передавать и распределять большую активную мощность (рис. 42). На рис. 42, *а* видно, что увеличение коэффициента мощности нагрузки $\cos\varphi = P/S$ от 0,8 до 0,9 уменьшает потери энергии при ее передаче на 20%. Одновременно при этом пропускная способность увеличивается более чем на 10% (рис. 42, *б*). Генераторы электрических станций, на которые сейчас в основном ложится задача генерирования реактивной мощности, в случае ее компенсации могли бы на 10—15% увеличить активную мощность вырабатываемой энергии. Естественно, при этом потребуются более мощные паровые и гидравлические турбины.

Компенсация реактивной мощности потребителей приводит не только к уменьшению потерь энергии и

улучшению ее качества на зажимах приемников, но часто является средством снижения капитальных затрат на предприятиях при реконструкции системы электроснабжения. Действительно, при развитии предприятий, связанных с увеличением мощности потребляемой электроэнергии, возникает необходимость замены на более мощные трансформаторов, кабелей, выключателей и другого оборудования. Если в электропотреблении значительную долю составляла реактивная мощность, то, скомпенсировав ее, можно снизить (или даже устранить) реактивный ток и благодаря этому увеличить нагрузку указанных элементов активной мощностью, не заменяя старого оборудования.

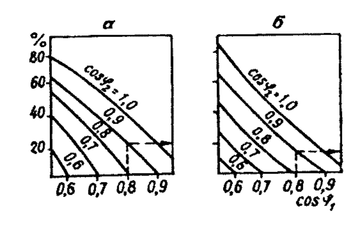


Рис. 42. Влияние компенсации реактивной мощности на уменьшение потерь энергии при передаче (*а*) и увеличение пропускной способности линии (*б*)

Применение компенсации реактивной мощности как средства повышения качества электроэнергии и снижения ее потерь особенно актуально для сельскохозяйственных районов. В них имеет место быстрый рост электропотребления с опережающими темпами роста потребления энергии с реактивной компонентой мощности. Последнее обусловлено большой удельной мощностью асинхронных электродвигателей, часто работающих в недогруженном режиме. При этом график реактивной мощности еще более неравномерен, чем на большинстве промышленных предприятий. К тому же сельскохозяйственные потребители электроэнергии, как правило, питаются от относительно маломощных сетей. Одним из наиболее эффективных средств компенсации реактивной мощности являются конденсаторы, которые в цепях переменного тока потребляют отрицательную (или иначе — генерируют положительную) реактивную мощность.

Конденсаторы для компенсации реактивной мощности включаются параллельно нагрузке и последовательно с ней. На практике используются оба способа (первый чаще). Значительно реже применяется последовательно-параллельная или параллельно-последова-

тельная емкостная компенсация реактивной мощности потребителей электрической энергии.

Различают также индивидуальную компенсацию, когда к зажимам каждого потребителя электроэнергии, например к электродвигателям, подключаются свои конденсаторы, групповую компенсацию, при которой конденсаторы или батарея конденсаторов осуществляют компенсацию реактивной мощности группы потребителей и централизованную (системную) компенсацию больших реактивных мощностей. Разумеется, конденсаторы не единственная возможность генерирования реактивной мощности.

В настоящее время в энергетических системах кроме генераторов на электрических станциях, конденсаторов реактивную мощность генерируют синхронные компенсаторы — крупные электрические машины, по конструкции близкие к синхронным генераторам, а также синхронные электродвигатели*.

Большим преимуществом этих источников мощности по сравнению с конденсаторами является возможность регулирования величины и знака их реактивной мощности с помощью тока возбуждения в обмотке ротора. Однако они имеют такие недостатки, как бо́льшие, чем у конденсаторов, потери энергии, большая инерционность в регулировании и наличие движущихся частей, усложняющих и удорожающих эксплуатацию.

Синхронные компенсаторы экономически целесообразно применять при больших мощностях (порядка десятков — сотен миллионов вольт-ампер), причем наращивание компенсирующих мощностей можно осуществлять только большими ступенями. В то же время конденсаторы дают возможность создавать статические источники реактивной мощности и легко наращивать эти мощности путем соединения отдельных конденсаторов в батареи (от единиц киловольт-ампер до тысяч мегавольт-ампер).

Другое преимущество конденсаторов заключается в возможности сочетать компенсацию реактивной мощности с фильтрацией высших гармоник (см. пункт 12),

* Высоковольтные воздушные (при малой нагрузке) и кабельные линии электропередачи также генерируют довольно значительную реактивную мощность за счет зарядного тока распределения емкости этих линий.

что невыполнимо для синхронных компенсаторов и двигателей.

При компенсации реактивной мощности с помощью конденсаторов или других средств, о которых сказано выше, могут иметь место режим недокомпенсации (когда реактивная мощность нагрузки $Q_н$ больше реактивной мощности компенсирующего устройства $Q_к$), режим полной компенсации $Q_к = Q_н$ и режим перекомпенсации $Q_к > Q_н$ (см. рис. 41, *в*). Режим перекомпенсации может быть таким же ущербным, как и отсутствие компенсации, поскольку реактивные емкостные токи обусловливают такие же вредные эффекты, о которых уже шла речь.

По различным причинам в электроэнергетике компенсацию реактивной мощности осуществляют на разных уровнях напряжения (низком, среднем, высоком и сверхвысоком), стараясь распределить мощности конденсаторов наиболее эффективным образом.

Критерии оптимизации распределения источников реактивной мощности по энергосистемам и потребителям различны для разных сетей и уровней напряжения и в определенной мере противоречивы.

Для сетей высокого и сверхвысокого напряжения основная проблема — это стабилизация уровня напряжения, особенно во время минимальной нагрузки, так как из-за значительной зарядной мощности в такие часы существенно повышается напряжение на них.

Для сетей среднего напряжения самая важная проблема — снижение потерь энергии. Для протяженных и слаборазветвленных высоковольтных сетей первостепенная проблема — обеспечение устойчивости передачи электроэнергии и непосредственно связанная с нею проблема передачи наибольших количеств энергии при минимальных затратах.

Так, из-за индуктивного сопротивления линии электропередачи, которое тем больше, чем длиннее линия и выше напряжение, предельная мощность потока энергии оказывается ограниченной значением, определяемым по формуле $P = \frac{U_1 U_2}{X_L} \sin\psi$, где U_1, U_2 — напряжения на шинах передающей и приемной подстанций, ψ — угол сдвига фаз между векторами этих напряжений, X_L — индуктивное сопротивление линии. Из приве-

денной формулы видно, что для увеличения передаваемой мощности необходимо повышать напряжение линии (это согласуется с необходимостью увеличения напряжения для снижения потерь энергии), угол сдвига фаз ψ и снижать индуктивное сопротивление линии электропередач.

В настоящее время используются все эти пути повышения пропускной способности линий электропередачи. Так, если последовательно в линию включить конденсаторы, то можно снизить ее эквивалентное реактивное сопротивление практически до нуля, так как $X=X_L-X_c$, где X_c — емкостное сопротивление конденсаторов. Это средство позволяет повысить пропускную способность линий электропередачи до уровня теплового предела, зависящего от активного сопротивления линии и ее конструкции, при условии тепловой стабильности. Последний на некоторых линиях может в 1,5—2 раза и более превышать предельную пропускную способность, определяемую по условию обеспечения устойчивости параллельной работы.

В этом случае активная мощность передаваемой по линии энергии будет выражаться соотношением $P=\frac{U_1U_2}{X_L-X_c}\sin\psi$. Графические зависимости относительной мощности передаваемой энергии от угла ψ и длины линии электропередачи с напряжением 500 кВ (рис. 43), например, показывают, что если емкостное сопротивление конденсаторов составляет 60% от индуктивного сопротивления линии электропередачи, то при $\psi=10$ электрических градусов предельная передаваемая мощность составит более $1\cdot P_{нат}$ при длине линии 300 км, тогда как в отсутствие конденсаторов ($X_c=0$) при том же угле ψ предельная передаваемая мощность составит около 0,5 от натуральной мощности* при длине линии в 250 км.

Положительный эффект от включения последовательных конденсаторов не ограничивается увеличением пропускной способности линий (обычно на 20—50%). Снижая реактивное сопротивление линии, конденсаторы способствуют увеличению запаса устойчивости па-

* Натуральная мощность передается по линии, нагруженной на ее волновое сопротивление, т. е. в режиме без отраженных волн.

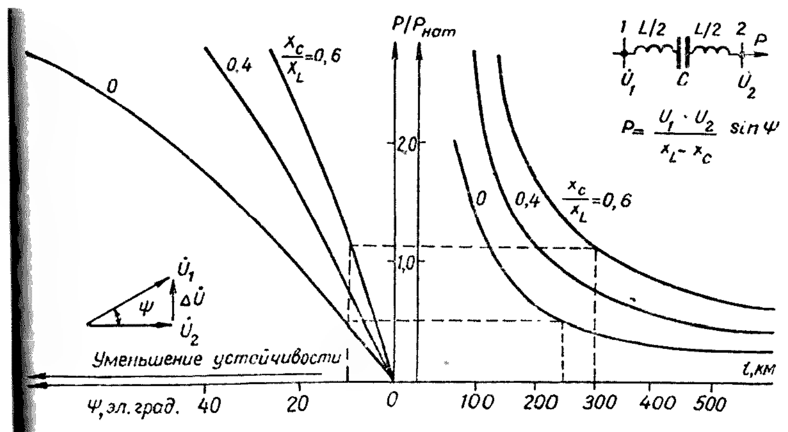


Рис. 43. Зависимость относительной мощности передаваемой энергии от длины линии электропередачи напряжением 500 кВ и угла сдвига фаз напряжений на концах линии

раллельной работы, поскольку появляется возможность уменьшения угла ψ.

Другими положительными результатами являются уменьшение потери напряжения в линии электропередач, а также снижение диапазона регулирования напряжения U_1 при изменениях мощности, передаваемой по линии электроэнергии.

С увеличением мощностей энергии, передаваемой на большие расстояния, последствия от аварий в энергетических системах становятся все серьезнее. Поэтому очень важен вопрос повышения надежности электроснабжения. Одно из средств ее повышения — это передача энергии с помощью параллельных высоковольтных линий, поскольку при аварии на одной из линий другие могут быть сохранены в работе и передавать энергию, хотя и в меньшем количестве. Число параллельных линий определяется мощностью передаваемой энергии и напряжением передачи.

Стоимость сооружения линий передачи электроэнергии на высоком и сверхвысоком напряжении чрезвычайно велика. Поэтому в ряде случаев существенно экономичнее применять батареи продольной емкостной компенсации, чем строить дополнительные линии.

Установка таких батарей на уже имеющихся параллельных линиях электропередач является эффектив-

ным средством повышения надежности электроснабжения за счет возможности повысить пропускную способность остающейся в работе линии при аварии на другой. Такой резерв в передаче необходим, например, при расположении очень крупной генерирующей станции вблизи мощного потребителя электроэнергии.

В связи с тем, что на батарее действует высокое напряжение и через нее протекают значительные по силе токи, ее собирают из большого числа (до нескольких десятков тысяч штук) единичных конденсаторов. Конденсаторы соединяют в параллельные группы, которые включаются последовательно. В батареях продольной емкостной компенсации применяют конденсаторы с относительно невысоким номинальным напряжением (обычно 0,66; 1,05; 1,5 кВ), имеющие реактивную мощность от десятков до сотен киловольт-ампер.

Суммарная реактивная мощность конденсаторов установок продольной компенсации (УПК) различна в зависимости от длины линии и ее напряжения, и для линий 400 кВ, например, она обычно составляет от 200 до 800 Мвар.

Кроме конденсаторов УПК содержат высоковольтное оборудование, с помощью которого осуществляются подключение и отключение батареи конденсаторов, а также защита их от перенапряжений (рис. 44).

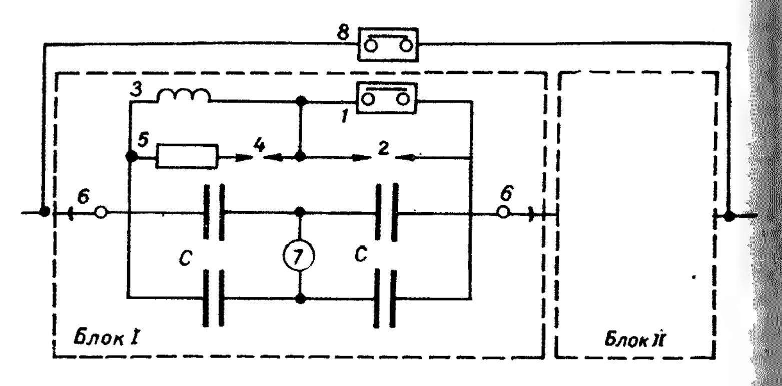


Рис. 44. Упрощенная принципиальная схема одной фазы установки продольной компенсации:

1 — шунтирующий выключатель; 2, 4 — разрядники; 3 — реактор; 5 — демпфирующий резистор; 6 — разъединители; 7 — датчик релейной защиты от небаланса токов; 8 — обходной выключатель

При возникновении на батарее недопустимых перенапряжений, например при коротком замыкании на линии электропередачи, пробивается и начинает проводить ток искровой разрядник *2*, ограничивая напряжение на конденсаторах. При этом релейная защита включает шунтирующий выключатель *1*.

Реактор *3* — мощная высоковольтная катушка индуктивности — служит для ограничения амплитуды разрядного тока батареи. Резистор *5* совместно с искровым разрядником *4* увеличивает скорость затухания колебаний тока в разрядном контуре (при срабатывании разрядника *4* резистор подключается параллельно реактору *3* и снижает его добротность).

Если ток в линии достигнет допустимого для батареи значения, например, в результате отключения места короткого замыкания в приемной системе, то шунтирующий выключатель отключается и вводит батарею в работу (ток линии снова начинает протекать через конденсаторы).

За интервал времени, в течение которого включен выключатель *1*, искровой разрядник *2* деионизируется и восстанавливает свою электрическую прочность. Кроме этих цепей главной защиты несколько последовательно включенных групп конденсаторов также защищаются разрядниками, ограничивающими амплитуду напряжения на цепочках конденсаторов. Имеется также защита от перегрузки высшими гармониками тока. Для ремонта батареи и ее полного шунтирования в случае неисправности служат разъединители *6* и выключатель *8*.

Поскольку конденсаторы и остальное силовое оборудование установок продольной емкостной компенсации находятся под высоким напряжением относительно земли (это фазное напряжение линии), то они устанавливаются на платформы, изолируемые от земли на высоте 4—6 м с помощью опорных или подвесных изоляторов. В целом такие установки представляют собой довольно грандиозные сооружения (рис. 45). Высокое напряжение порождает определенные трудности с передачей команд защиты и управления с земли. Сейчас они преодолеваются с помощью оптических систем передачи информации.

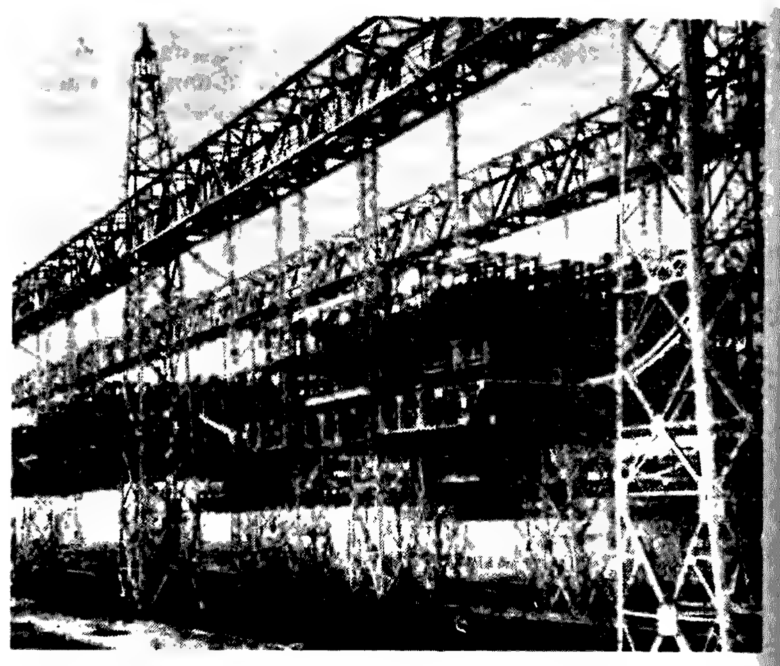


Рис. 45. Внешний вид конструкции УПК

Недостаток нерегулируемых по величине емкости продольных компенсирующих батарей, заключающийся в том, что все перегрузки батареи по току приводят к соответствующим перегрузкам конденсаторов по напряжению, обусловливает необходимость использования конденсаторов с достаточно большим запасом электрической прочности.

С помощью специальных устройств возможно управление значением емкости продольной компенсирующей батареи. Схема одной фазы такого устройства и временные диаграммы, поясняющие его работу, показаны на рис. 46. Устройство состоит из конденсатора *1* и двух полностью управляемых вентилей *2* и *3*, включенных параллельно конденсатору. До момента времени t_1 проводит ток вентиль *2*, а напряжение на конденсаторе равно нулю. В момент времени t_1 вентиль *2* выключается и ток с этого момента протекает через конденсатор. Это состояние сохраняется до момента

t_2, когда в результате изменения направления тока в линии напряжение на конденсаторе становится равным нулю. Во время t_2 включается вентиль *3*, и с этого момента и до t_3 ток линии проходит через вентиль, минуя конденсатор *1*. В момент времени t_3 вентиль *3* выключается, в результате чего конденсатор второй раз за период оказывается включенным последовательно в линию. Далее цикл работы аналогичен предыдущему. Анализ показывает, что в таком устройстве эквивалентная емкость регулируется путем изменения угла регулирования α (рис. 46, *б*) в соответствии с выражением $C_э = \frac{\pi}{2} \frac{C_н}{\alpha - \frac{1}{2}\sin\alpha}$, т. е. при изменении α от 0 до 90 электрических градусов эквивалентная емкость изменяется от бесконечно большого значения до номинальной емкости конденсатора *1* ($C_н$).

Приведенное устройство обладает высоким быстродействием, составляющим около 0,01 с при частоте 50 Гц. Однако существенными недостатками его являются высокая стоимость мощных высоковольтных вентилей, которые должны быть полностью управляемыми, нелинейность устройства, из-за чего ухудшается гармонический состав напряжения, а также увеличенные потери энергии.

Продольная емкостная компенсация индуктивного сопротивления линий электропередачи используется не только для повышения их пропускной способности, но и для уменьшения резких и быстрых колебаний напряжения на конце подводящей энергию линии, возникающих в результате изменений тока нагрузки. Примером являются линии электропередачи для питания электрифицированных железных дорог, крупных потребителей на электрометаллургических заводах и т. д.

При продольной емкостной компенсации реактивная мощность конденсаторов зависит от квадрата тока, протекающего через них ($Q=I^2/\omega C$), т. е. они оказывают компаундирующее действие. При изменениях тока нагрузки реактивная мощность последовательных конденсаторов изменяется в тех же направлениях, что и ток, благодаря чему возникает эффект стабилизации напряжения. К сожалению, большинство потребителей плохо приспособлено к компенсации реактивной мощ-

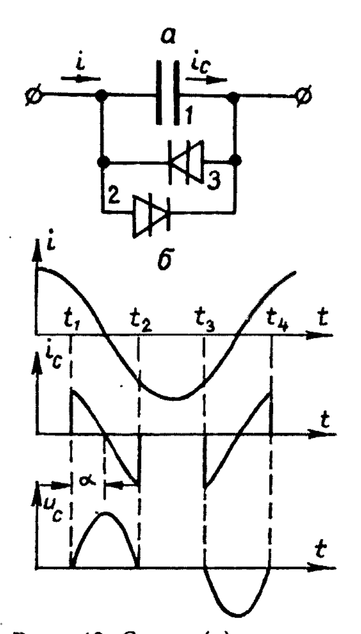


Рис. 46. Схема (*а*) и временные зависимости (*б*) токов и напряжений УПК с плавной регулировкой эквивалентной емкости

ности с помощью последовательных конденсаторов. Это обусловлено тем, что при включении последовательных конденсаторов напряжение на активно-индуктивной нагрузке возрастает (при полной компенсации имеет место резонанс напряжений) и становится отличным от стандартных уровней, принятых для сетей и потребителей. Поэтому продольную емкостную компенсацию потребителей энергии, как правило, применяют при питании специально спроектированных устройств, рассчитанных на такой вид компенсации реактивной мощности.

В энергосистемах и на промышленных предприятиях устанавливают также батареи поперечной (параллельной или шунтовой) компенсации реактивной мощности. Здесь основное назначение конденсаторов — централизованное генерирование реактивной мощности в узлах энергосистем с целью регулирования напряжения в системе и потоков реактивной мощности, направленное на уменьшение потерь энергии.

Мощность таких системных батарей довольно велика (десятки—сотни мегавольт-ампер). На энергоемких производствах (электрометаллургических заводах, электролизных предприятиях и т. д.) устанавливают компенсирующие батареи шунтовых конденсаторов, мощности которых приближаются к мощностям системных батарей. Батареи шунтовых конденсаторов через соответствующие коммутационные аппараты подключают к проводам высоковольтной линии электропередачи (или к шинам подстанции) либо через трансфор-

маторы. Обычно для этого используется третичная обмотка понижающих трансформаторов.

Кроме системных батарей шунтовых конденсаторов для компенсации реактивной мощности на промышленных предприятиях, на подстанциях распределительных сетей устанавливаются относительно небольшие по мощности (от десятков до тысяч киловольт-ампер) батареи групповой компенсации.

Мощность шунтовых конденсаторных батарей и места расположения их в энергосистеме определяются путем оптимизационных расчетов на ЭВМ. Главная цель, которую стремятся достичь,— это получение минимума затрат на производство, передачу и распределение электроэнергии. Бо́льшая часть установок шунтовых конденсаторов (до 70—80% от всей реактивной мощности), как показывают расчеты, должна располагаться на низком напряжении. Шунтовые батареи конденсаторов особенно необходимы, когда в энергосистеме возникает дефицит реактивной мощности. А возникает он, если реактивная мощность потребителей превышает генерирующую способность системы по реактивной мощности. В результате дефицита реактивной мощности напряжение у потребителей энергии снижается до уровня, при котором восстанавливается баланс по реактивной мощности. Такое восстановление баланса происходит благодаря снижению потребления реактивной мощности некоторыми нагрузками при снижении питающего напряжения, а также за счет того, что возбуждение синхронных генераторов на электростанциях (и соответственно напряжение на их зажимах) увеличивается до необходимого уровня для повышения вырабатываемой ими реактивной мощности. С этой же целью в энергосистеме включают все конденсаторные батареи и другие источники реактивной мощности. Вместе с тем во время малых электрических нагрузок (особенно в ночное время) в узлах энергосистем, где включены шунтовые батареи, может возникать избыток реактивной мощности. В связи с этим вблизи них больше нормы повышается напряжение и увеличиваются потери энергии. Поэтому часть конденсаторов батареи либо всю батарею необходимо отключать на этот интервал времени.

Для установок низкого и среднего напряжений эти проблемы решаются сейчас путем ступенчатого подключения частей батареи с помощью электромеханических выключателей вручную (обслуживающим персоналом) либо автоматически с помощью специальных устройств. В обоих случаях включение и отключение конденсаторов производятся по сигналам датчиков, измеряющих величину и направление реактивной мощности, реактивный ток и напряжение.

В настоящее время используются нерегулируемые и ступенчато регулируемые конденсаторные установки, служащие для параллельной компенсации реактивной мощности. Нерегулируемые установки обычно предназначаются для компенсации неизменной (базисной) части реактивной мощности нагрузки, а регулируемые, имеющие от одной до шести ступеней по Q, частично компенсируют изменяющуюся часть этой мощности. Промышленность выпускает комплектные конденсаторные установки на напряжение от 0,38 до 10,5 кВ, в которых конденсаторы вместе с коммутирующей, защитной и регулирующей аппаратурой расположены в металлических шкафах. Это облегчает и удешевляет монтаж и эксплуатацию компенсирующих батарей.

Однако способам регулирования мощности конденсаторных батарей с помощью контактной аппаратуры присущи недостатки: неплавное (скачкообразное) изменение мощности, малое быстродействие, из-за чего такие устройства не способны реагировать на быстрые изменения напряжения и реактивной мощности; броски тока через выключатели и конденсаторы. Такие установки из-за искрения контактов выключателей являются источниками радиопомех. Поэтому в последнее десятилетие разработаны устройства бесконтактного ступенчатого и плавного регулирования реактивной мощности конденсаторной батареи с помощью тиристоров. В первом случае механически выключатели заменяются тиристорными (рис. 47) с фиксированной

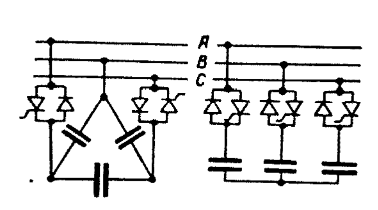


Рис. 47. Схемы подключения шунтовых конденсаторов к сети с помощью силовых полупроводниковых вентилей:
A, B, C — фазы трехфазной системы

фазой их включения относительно фазы сетевого напряжения, что позволяет избежать больших бросков тока и перенапряжений.

Тиристорное устройство с плавным регулированием величины и знака реактивной мощности показано на рис. 36 в штриховой рамке. Это устройство предложено советскими учеными В. А. Чвановым и В. В. Худяковым. Оно применяется в стабилизаторах напряжения (см. пункт 16) и в автономных инверторах тока. Реактивная мощность, потребляемая этим устройством из сети, определяется разностью мощностей параллельных конденсаторов и реакторов $L (Q = Q_L - Q_c)$. Реактивная мощность реакторов Q_L регулируется с помощью тиристоров.

Достоинством такого устройства является возможность быстрого и плавного регулирования реактивной мощности. Если в нем установить реакторы L, мощность которых превышает мощность конденсаторной батареи ($Q_L > Q_c$), то такое устройство может быть не только источником, но и потребителем положительной реактивной мощности, что важно, когда в системе имеется ее избыток. На основе силовых полупроводниковых приборов созданы и продолжают разрабатываться так называемые статические источники реактивной мощности с плавным ее регулированием, в которых конденсаторы выполняют функции принудительной коммутации вентилей (см. пункт 8), а сама реактивная мощность генерируется в результате потребления этими устройствами тока, опережающего сетевое напряжение на угол $\pi/2$.

Шунтовые батареи конденсаторов предельно больших мощностей, достигающих миллиардов вольт-ампер, устанавливают непосредственно на преобразовательных подстанциях систем передачи энергии постоянным током. Такие системы обеспечивают передачу энергии очень большой мощности (миллионы киловатт) на предельно большие расстояния — до нескольких тысяч километров. Это стало возможным благодаря переходу на сверхвысокое напряжение постоянного тока порядка миллиона вольт и более между полюсами (относительно земли напряжение полюсов в два раза ниже). Кроме передачи энергии на дальние расстояния такие преобразовательные комплексы используются как

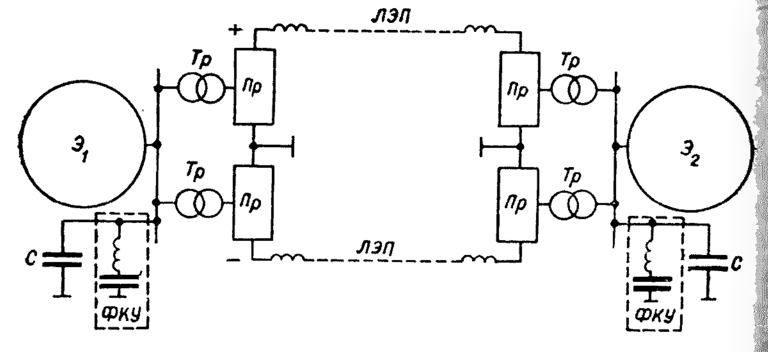


Рис. 48. Упрощенная принципиальная схема передачи электроэнергии на постоянном токе:

$Э_1$, $Э_2$ — первая и вторая энергосистемы; *С* — батареи компенсирующих конденсаторов; *Тр* — трансформаторы; *Пр* — преобразователи; *ФКУ* — фильтрокомпенсирующие устройства

вставки между энергосистемами, имеющими различные частоты или разные требования к качеству энергии.

Первые передачи постоянного тока строились для обеспечения энергетических связей между островами через проливы. Так, в 1954 г. Швеция ввела в эксплуатацию передачу постоянного тока между материком и островом Готланд*. Затем такие системы были построены в Японии.

Электрическая энергия передается в таких системах по однопроводному кабелю постоянного тока. В качестве второго провода используется морская вода, которая благодаря ионам солей обладает хорошей проводимостью. Вторым проводом в системах передачи энергии кратковременно может быть также земля (рис. 48). Эта возможность существенно повышает надежность передачи энергии.

В настоящее время во всем мире работают десятки передач постоянного тока. Одна из самых мощных ($P \approx 6 \cdot 10^6$ кВт) напряжением в 1,5 МВ предназначена для передачи энергии из Экибастуза в Центральную часть СССР на расстояние около 2500 км.

Преобразователи систем постоянного тока способны работать как в выпрямительном, так и в инверторном

* Практическое использование передач постоянного тока в промышленном масштабе началось в СССР в 1950 г. для передачи электроэнергии из Каширы в Москву.

режиме. Это обеспечивает передачу электроэнергии по линии в обоих направлениях. Несмотря на высокую стоимость преобразователей, системы постоянного тока получают все большее распространение в связи с более низкой стоимостью линии электропередачи и с их широкими возможностями, в частности большой пропускной способностью.

Однако они имеют и ряд недостатков, ухудшающих их технико-экономические характеристики. Так, при работе выпрямитель потребляет реактивную мощность примерно равную $Q = P \cdot \mathrm{tg}\alpha$, где P — активная мощность преобразуемой энергии, α — угол управления вентилями выпрямителя. Эта реактивная мощность в системах передачи энергии на постоянном токе частично (около 50—60%) покрывается за счет мощности генерируемой конденсаторами силовых фильтров высших гармоник (5, 7, 11 и 13-й), устанавливаемых на преобразовательных подстанциях, и частично за счет шунтовых конденсаторов, т. е. здесь используются фильтрокомпенсирующие устройства и чисто компенсирующие батареи конденсаторов (см. рис. 48).

В системах постоянного тока по линии передается энергия, мощность которой является чисто активной. При обратном преобразовании (инвертировании) постоянного тока в переменный с помощью инверторов с естественной коммутацией вентилей (т. е. под действием напряжения сети) происходит потребление из сети переменного тока реактивной мощности, близкой к $Q = P \cdot \mathrm{tg}\beta$, где β — угол опережения отпирания вентилей инвертора.

Поэтому на инверторной подстанции также необходима компенсация реактивной мощности. Она осуществляется таким же образом, как и на выпрямительной (см. рис. 48). Кроме того, в приемной системе необходимо дополнительно устанавливать источники реактивной мощности для компенсации мощности потребителей электрической энергии.

В мощных шунтовых батареях используют последовательно-параллельное соединение большого числа конденсаторов. Для уменьшения числа единичных конденсаторов в установках поперечной компенсации применяют конденсаторы с максимально возможной номинальной реактивной мощностью (от 60 до 150 квар

и более). Тем не менее число конденсаторов в крупных батареях достигает нескольких сотен и даже тысячи единиц. Конденсаторы монтируют на опорных изоляторах, обеспечивающих их изоляцию от земли (рис. 49).

Для батарей параллельной емкостной компенсации реактивной мощности также существует проблема защиты конденсаторов от перенапряжений, но она уже связана не с аварийными режимами, как при последовательном включении батарей, а с переходными процессами при включении батареи под напряжением и особенно при отключении батареи от сети. При включении батареи протекает колебательный процесс зарядки конденсаторов.

Колебательный контур образуется конденсаторами и эквивалентной индуктивностью сети (линии, трансформаторов, генераторов). Возникающее при этом на конденсаторах напряжение может в два раза превышать напряжение сети. Бóльшие (до трех-, четырехкратного значения) перенапряжения на конденсаторах появляются при повторных зажиганиях дуги в выключателе при отключении батареи. Поэтому в шунтовых батареях, как и в батареях продольной емкостной компенсации, конденсаторы защищают от перенапряжений с помощью искровых разрядников и мощных линейных и нелинейных резисторов.

При срабатывании разрядников ток разряда конденсаторов может достигать десятков и даже сотен тысяч ампер. Он может приводить к повреждению предохранителей конденсаторов, разрядников и другого оборудования. Поэтому созданы системы защиты с помощью разрядников и ограничивающих ток нелинейных резисторов.

Аналогичная проблема возникает при включении шунтовой батареи в сеть, в которой поблизости уже имеется подключенная конденсаторная батарея. В таких случаях батарея, находящаяся под напряжением, разряжается на вторую батарею. Так как активное и индуктивное сопротивления цепи между батареями и самих батарей обычно малы, то возникает бросок тока, амплитуда которого в сотни раз может превысить установившийся ток батареи. При этом могут возникать слабозатухающие высокочастотные токи, способные расплавить вставки защитных предохранителей.

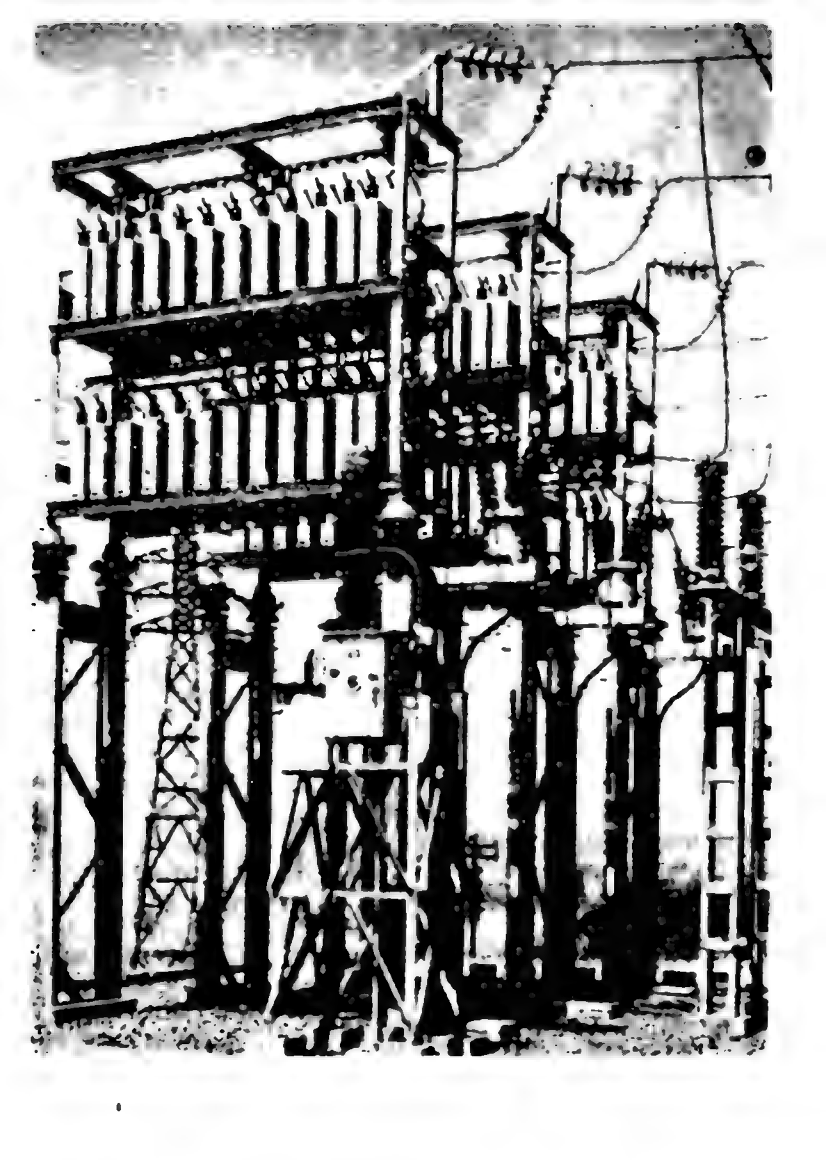


Рис. 49. Внешний вид конструкции батареи шунтовых конденсаторов средней мощности

Решение отмеченных проблем очень актуально для повышения надежности эксплуатации конденсаторных батарей, так как число их включений и отключений может достигать сотен раз в год (для крупных батарей) и десятков тысяч (для мелких батарей).

Токи повышенной частоты в батарее шунтовых конденсаторов возникают не только из-за пробоев защитных искровых разрядников при перенапряжениях и при их включении в работу, но и вследствие искажения сетевого напряжения высшими гармониками. Частоты высших гармоник сетевого напряжения относительно невелики (сотни—тысячи герц). Причины появления высших гармоник и методы борьбы с ними с помощью фильтров описаны в пункте 12.

Особенностью борьбы с высшими гармониками в сетях с параллельными конденсаторами является возможность возникновения резонанса напряжений или тока на частоте одной из высших гармоник. При резонансах возникают большие нагрузки по напряжению и току элементов контуров, которые могут, в частности, привести к выходу из строя конденсаторов или ускоренному их старению. Для устранения возможного возникновения резонансных явлений последовательно с батареей шунтовых конденсаторов включают реактор, индуктивность которого рассчитывается так, чтобы резонансная частота была ниже частот высших гармоник.

Особенность эксплуатации конденсаторов как в батареях последовательной, так и параллельной компенсации большой мощности в том, что из-за последовательного включения групп параллельных рядов конденсаторов распределение напряжения по группам зависит от емкости группы: там, где она больше, напряжений на ней меньше и наоборот. В свою очередь, емкость группы определяется емкостью включенных параллельно конденсаторов. В процессе эксплуатации емкость единичного конденсатора изменяется как из-за процессов старения (емкость при этом обычно возрастает на несколько процентов), так и из-за перегорания по различным причинам секционных внутренних предохранителей (емкость конденсатора при этом незначительно уменьшается). Емкость параллельного ряда конденсаторов, состоящего обычно из восьми—одиннадцати единиц, сильнее (изменения порядка 10%)

уменьшается при пробое одного из конденсаторов и отключении его внешними предохранителями.

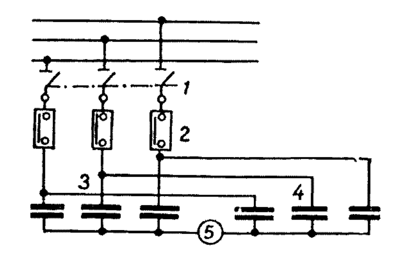


Рис. 50. Упрощенная схема включения конденсаторов в шунтовой батарее:

1 — разъеднинтель; *2* — выключатель; *3*, *4* — конденсаторы; *5* — датчик дифференциальной релейной защиты

При воздействии на конденсаторы повышенного напряжения их ресурс сокращается из-за более интенсивного процесса старения, такие конденсаторы сильнее нагреваются, и в них возрастает интенсивность ионизационных процессов. Поэтому в батареях периодически контролируется величина емкости групп и отдельных конденсаторов, а дефектные единицы заменяются.

Контроль емкости важен также с позиций обеспечения симметрии батареи по фазам, так как несимметричная нагрузка вызовет несимметрию напряжений с вытекающими отсюда последствиями (см. пункт 16).

Поэтому в крупных шунтовых батареях (как в установках продольной компенсации) имеются сигнализация и защита, реагирующие на несимметрию по емкости. Они осуществляются, например, путем измерения разности токов в двух частях батареи. На рис. 50 цифрой *5* обозначен датчик такой дифференциальной защиты. При возникновении небольшой несимметрии в датчике появляется разностный ток, который сигнализирует о ней. При большой несимметрии от этого тока (большего по величине) срабатывает реле, дающее команду на отключение батареи.

В мощных шунтовых конденсаторных батареях при выходе из строя одного или двух конденсаторов весьма эффективен автоматический ввод резервных конденсаторов в параллельных рядах. Это осуществляется с помощью симметричных тиристоров со специальной полупроводниковой системой управления. Ввод резерва позволяет сохранить батарею в работе в случае аварий в системе, когда она наиболее необходима, и сократить число отключений батареи для ремонта.

Батареи шунтовых конденсаторов устанавливают в неотапливаемых помещениях и на открытых подстанциях. Поэтому в процессе эксплуатации конденсаторы могут подвергаться действию низких и повышенных температур, влаги, загрязнений. Эти факторы учитываются при проектировании конденсаторов и батарей. В районах повышенной сейсмической деятельности приходится принимать во внимание и этот факт, в частности при расчете механической прочности конструкции батареи.

20. Примеры применения конденсаторов для индивидуальной компенсации реактивной мощности потребителей электрической энергии

В настоящее время для целей освещения широко применяются газоразрядные люминесцентные лампы дугового разряда (ртутные, натриевые и др.). Они имеют нелинейные сопротивления, падающие с ростом тока. Напряжение на лампах после зажигания составляет десятки вольт. Поэтому их питание осуществляется от сети переменного тока через балластные (гасящие) сопротивления. Чтобы потери энергии были минимальными, балластные сопротивления должны быть реактивными. Наиболее подходящими для этой цели являются дроссели (катушки индуктивности), хотя в качестве балластных могут быть использованы и емкостные элементы (см. пункт 15). С индуктивным балластным сопротивлением отсутствуют броски тока через лампу при переходе напряжения через ноль, а ток содержит меньше высших гармоник. Однако дроссель потребляет значительную реактивную мощность, более чем в два раза превышающую активную мощность устройства, которую необходимо компенсировать с помощью конденсаторов (рис. 51).

Конденсаторы в таких источниках света не только устраняют потребление реактивной мощности, но и улучшают условия пуска и стабильность работы ламп.

К конденсаторам для светильников с газоразрядными лампами предъявляются довольно жесткие требования: они должны иметь большой срок службы (до

нескольких десятков тысяч часов), надежно работать в условиях низких и повышенных температур (от —30 до +50°С), быть герметичными, негорючими и взрывобезопасными. Для этого разработана и выпускается промышленностью серия конденсаторов на напряжение 250 и 400 В с широким диапазоном емкостей (от 0,5 до 100 мкФ).

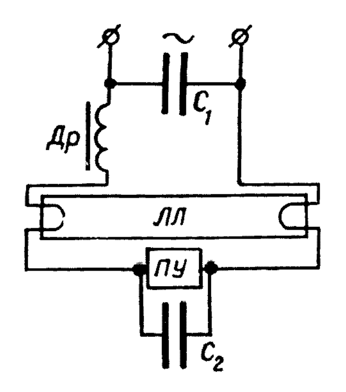


Рис. 51. Схема компенсации реактивной мощности в газоразрядных источниках света:

ЛЛ — люминесцентная лампа; C_1 — компенсирующий конденсатор; C_2 — помехоподавляющий конденсатор; *ПУ* — пусковое устройство

Значительную реактивную мощность (по отношению к активной) потребляют из питающей сети сварочные аппараты переменного тока. Трансформаторы сварочных аппаратов из-за ослабленной связи между первичной и вторичной обмотками имеют повышенное индуктивное сопротивление, играющее роль балласта — ограничителя тока сварочной дуги.

Другими электротехнологическими устройствами, реактивная мощность которых существенно больше активной, являются установки индукционного нагрева. В них материалы нагреваются за счет вихревых токов и потерь на гистерезис (в случае ферромагнитных материалов), возникающих под действием переменного магнитного поля за счет ЭДС электромагнитной индукции. Это поле возбуждается индуктором-катушкой, подключенной к сети 50 Гц или к специальным источникам повышенной частоты. Индукционные установки низких, средних и высоких частот эффективно используют для плавки металлов, поверхностной и местной закалки, пайки и сварки, для их нагрева перед штамповкой, ковкой. Индукционный нагрев на высоких частотах применяют при производстве чистых полупроводниковых материалов, для плавки стекла, например при производстве микропровода и т. д.

Вместе с тем индуктор таких установок представляет собой катушку индуктивности с очень малым ак-

тивным сопротивлением по сравнению с реактивным. Например, при частоте 50 Гц реактивная мощность индукторов плавильных печей в несколько раз превышает активную. Для более высокочастотных индукторов эта разница еще больше. Поэтому для компенсации реактивной мощности индукторов используют конденсаторы. На частоте 50 Гц для этой цели обычно применяют параллельные конденсаторы, суммарная мощность которых в одной установке может достигать нескольких тысяч киловольт-ампер.

Для питания индукторов токами повышенных частот (среднечастотные установки от 100 до 20 000 Гц и высокочастотные установки с большими частотами) используют различные преобразователи (статические и вращающиеся).

Вращающиеся преобразователи представляют собой систему из двигателя и механически соединенного с ним генератора или одноякорные преобразователи, в которых двигатель и генератор повышенной частоты представляют собой одну электрическую машину.

Для целей индукционного нагрева существуют статические преобразователи двух видов: электромагнитные (с пульсирующим и вращающимся магнитным полем) и вентильные (тиристорные и ламповые). В электромагнитных преобразователях эффект умножения частоты достигается в результате насыщения магнитопроводов.

Путем соответствующей схемы соединения обмоток на выходе преобразователя подавляется напряжение с частотой питающей сети и выделяется напряжение одной из высших гармоник, возникающих при насыщении ферромагнитных сердечников.

Для питания трехфазных нагрузок повышенной частоты в последнее десятилетие разработаны более простые по конструкции и технологичные в производстве ферромагнитные умножители частоты с вращающимся магнитным полем. По конструкции они подобны трехфазным машинам переменного тока, но с двумя или более обмотками на статоре. В них также используется эффект возникновения высших гармоник во вращающемся магнитном поле при насыщении отдельных участков магнитопровода. Эти преобразователи

характеризуют высокая симметрия трехфазной системы напряжения и его форма, близкая к синусоиде.

Электромагнитные преобразователи частоты с пульсирующим магнитным полем впервые были применены для умножения частоты электромашинных передатчиков на заре развития радиотехники. Затем они стали применяться для индукционного нагрева и питания высокооборотных электродвигателей.

С появлением мощных полупроводниковых управляемых вентилей-тиристоров и преобразователей на их основе электромашинные и электромагнитные преобразователи постепенно вытесняются ими. Для компенсации реактивной мощности нагрузки и самих преобразователей используются конденсаторы, включенные параллельно, последовательно и последовательно-параллельно.

Эффект, достигаемый от компенсации реактивной мощности, заключается в уменьшении мощности преобразователя, которая при полной компенсации становится почти равной активной мощности нагрузки. Эта же цель преследуется при использовании контурных конденсаторов в мощных ламповых генераторах высокой частоты. Кроме этого, работа генератора на чисто активную нагрузку повышает его КПД и уменьшает искажение тока. В электромагнитных преобразователях частоты последовательные конденсаторы компенсируют индуктивное сопротивление преобразователей, благодаря чему напряжение на нагрузке меньше зависит от ее тока.

В зарубежной печати появились сообщения о разработке систем дальней связи на сверхдлинных волнах, распространяющихся вблизи поверхности земли. Для компенсации реактивной мощности антенны, представляющей систему проводников протяженностью в десятки километров, расположенных в грунте, предполагается использовать конденсаторы, установленная мощность которых составляет десятки тысяч киловольт-ампер.

Компенсация реактивной мощности с помощью конденсаторов обеспечивает экономически целесообразную систему бесконтактного электроснабжения рудничных электровозов и другого электрического транспорта, работающего во взрывоопасных условиях.

В таких системах источник энергии повышенной частоты питает линию, играющую роль передающей антенны. С ней индуктивно связана антенна-энергоприемник на электровозе. Магнитное поле линии наводит в энергоприемнике (это катушка на крыше электровоза с большим числом витков) ЭДС, под действием которой после выпрямления в приводных двигателях протекает ток.

Бесконтактная индуктивная связь обеспечивает безопасность такой тяги, так как здесь отсутствуют искры, которые часто возникают на контактных электроприемниках троллейбусов, трамваев, электропоездов.

Для уменьшения размеров энергоприемника и по другим причинам частота тока выбирается более нескольких тысяч герц. На таких частотах индуктивное сопротивление линии электропередачи и энергоприемника контура становится настолько большим, что без компенсации его такая система неработоспособна.

С помощью конденсаторов, включаемых последовательно в провода линии и в контур энергоприемника на электровозе (рис. 52), эти сопротивления полностью компенсируются.

С помощью конденсаторов сопротивление контура передачи и приема электроэнергии становится чисто активным, что обеспечивает передачу энергии без

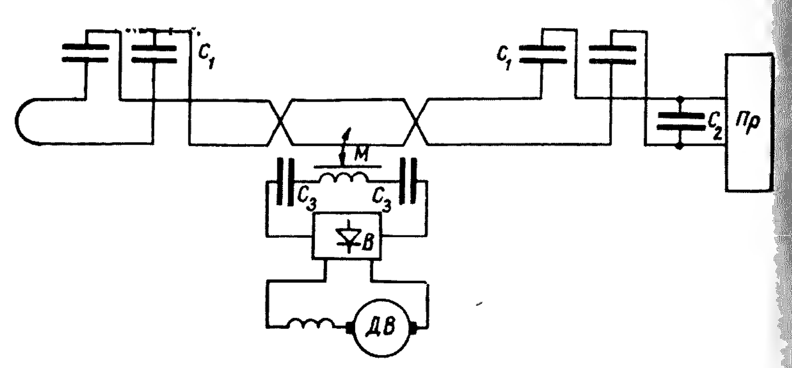


Рис. 52. Упрощенная схема бесконтактного энергоснабжения рудничного электровоза:

C_1 и C_3 — последовательные конденсаторы соответственно на компенсационных пунктах и электровозе; C_2 — параллельные конденсаторы, *Пр* — преобразователь частоты

больших потерь напряжения при минимально возможном напряжении питания.

Компенсация реактивной мощности в электротехнических установках средних частот осуществляется с помощью бумажных и бумажно-пленочных конденсаторов большой единичной мощности (сотни киловольт-ампер) с принудительным воздушным и водяным охлаждением, необходимым для отвода выделяющегося в них тепла. В последние годы разработаны чисто пленочные конденсаторы с малыми потерями энергии, не требующие принудительного охлаждения до частот вплоть до 100 кГц. К ним, в частности, относится разработанный для описанной выше системы бесконтактного электротранспорта полистирольный конденсатор мощностью более 200 квар на частоту 5 кГц.

Продольная емкостная компенсация индивидуальных потребителей электроэнергии применяется не только на повышенных частотах, но и на частоте 50 Гц. Особенно эффективна емкостная компенсация для уменьшения потери напряжения в сравнительно длинной маломощной ЛЭП, использующейся для питания крупных электрических машин. Такие случаи возникают на разработках рудных и других ископаемых с помощью мощных машин с электрическим приводом.

При пуске мощного электродвигателя им потребляется ток в 5—8 раз больший, чем номинальный, вследствие чего на сопротивлении ЛЭП резко увеличивается потеря напряжения, что приводит к затяжному пуску машины, ее перегрузке, а в некоторых случаях даже и к невозможности ее прямого пуска. В таких случаях продольная емкостная компенсация оказывается незаменимой для обеспечения быстрого и успешного пуска двигателя.

Схема включения конденсаторов с этой целью приведена на рис. 53. При включении главного выключателя *В* конденсаторы с помощью трансформаторов *Тр* оказываются включенными последовательно в каждую из фаз и через них протекает пусковой ток двигателя. Емкость конденсаторов *С* выбирается такой, чтобы скомпенсировать индуктивное сопротивление питающего трансформатора, ЛЭП и частично самого двигателя.

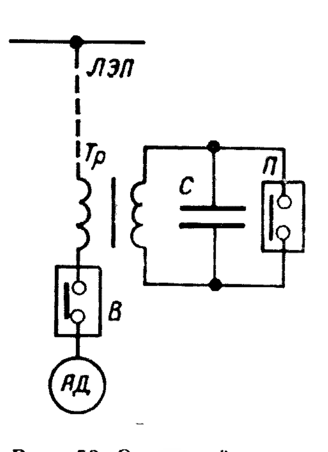


Рис. 53. Однолинейное изображение схемы включения последовательных конденсаторов для пуска мощного трехфазного асинхронного электродвигателя *АД*

Как только скорость вращения ротора двигателя приблизится к номинальной, его ток довольно быстро снизится до номинального значения. При этом напряжение на конденсаторах уменьшается и включается вспомогательный пускатель *П*, шунтирующий своими контактами конденсаторы.

Таким образом, конденсаторы осуществляют здесь продольную емкостную компенсацию только при пуске, т. е. сравнительно небольшой промежуток времени, так как в остальное время через них не проходит рабочий ток двигателя.

Конденсаторы можно включать непосредственно в фазы питающей линии без трансформаторов, однако при этом потребуется изоляция от земли их и шунтирующего пускателя.

Приведенная схема может быть дополнена рабочими конденсаторами, осуществляющими продольную емкостную компенсацию реактивной мощности двигателя. Такие конденсаторы остаются включенными последовательно в фазы линии, питающей двигатель, обеспечивая повышение напряжения на его зажимах до номинального значения.

Другим примером применения конденсаторов для компенсации реактивной мощности служит самовозбуждающийся асинхронный генератор. Он представляет собой асинхронную электромашину, вал которой вращается первичным механическим или электрическим двигателем.

Асинхронный генератор преобразует энергию первичного двигателя в электрическую путем взаимодействия вращающихся магнитных полей статора и ротора. Мощность этой энергии имеет чисто активный характер, так как является мощностью преобразованной механической энергии. Для образования вращающихся

магнитных полей по обмоткам статора или ротора должны протекать намагничивающие машину токи. По своему характеру они индуктивные, т. е. отстают по фазе от напряжения на зажимах генератора Таким образом, асинхронный генератор является источником активной мощности и потребителем положительной реактивной мощности. Для компенсации этой реактивной мощности, а также реактивной мощности нагрузки устанавливают компенсирующие конденсаторы. Они включаются параллельно с нагрузкой или параллельно-последовательно с ней.

Одно из объяснений конденсаторного возбуждения асинхронных генераторов следующее. Остаточное магнитное поле ротора при его вращении наводит в обмотках статора некоторую электродвижущую силу. Под действием этой ЭДС через конденсаторы, например включенные параллельно зажимам обмоток, потекут трехфазные токи, опережающие эти электродвижущие силы по фазе. Эти токи, протекая через обмотки, образуют вращающееся магнитное поле, которое, в свою очередь, обусловит возникновение в роторе токов, вызывающих рост его магнитного поля и увеличение ЭДС статорных обмоток. Такой процесс нарастания поля и ЭДС (возбуждение машины) протекает довольно быстро (доли секунды) до состояния, при котором в системе генератор—конденсаторы—нагрузка устанавливается баланс реактивной мощности ($Q_с = Q_г + Q_н$). Это возможно благодаря нелинейной зависимости намагничивающего тока генератора и некоторых видов нагрузок от напряжения. По достижении некоторого уровня напряжения магнитные системы начинают насыщаться и потреблять бóльшую реактивную мощность, благодаря чему устанавливается баланс мощностей.

Для возбуждения асинхронных генераторов необходима мощность конденсаторов примерно 25—45% от его активной мощности, а для компенсации реактивной мощности нагрузки еще примерно столько же при $\cos\varphi \approx 0{,}8$—$0{,}9$, а при меньшем $\cos\varphi$ необходима еще большая компенсирующая мощность. Это значительно удорожает систему питания с асинхронными генераторами. Другое отрицательное свойство связано с трудностью регулирования напряжения асинхронного гене-

ратора. Регулирование возможно путем изменения емкости конденсаторов, например, применяя нелинейные конденсаторы с сегнетоэлектриком (вариконды) или их комбинацию с линейными конденсаторами постоянной емкости.

Асинхронные генераторы характеризуются и положительными свойствами. Они просты, надежны, могут работать при переменной и постоянной частоте сети, допускают параллельную работу при несинхронной скорости вращения роторов, что невозможно для систем с синхронными генераторами.

Поэтому асинхронные генераторы (с конденсаторным возбуждением, а также с независимым возбуждением от синхронных генераторов) получили широкое распространение в авиации. Там за счет применения повышенных частот (400, 1000 Гц и более) габариты и масса энергетического оборудования получаются существенно меньше, чем при 50 Гц. Их также применяют в автономных наземных системах энергоснабжения в районах, удаленных от электрических сетей энергосистем. Высокий КПД асинхронных генераторов (он такой же, как у синхронных генераторов) и возможность работы с переменной скоростью вращения ротора позволяют эффективно использовать их совместно с гидротурбинами, обеспечивая высокий КПД последних изменением числа оборотов в зависимости от напора воды.

Генераторный режим асинхронных машин с конденсаторным возжудением используется не только для производства электроэнергии, но и для быстрого торможения асинхронных электродвигателей.

ГЛАВА IV

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНАЯ, НО НЕ ПОСЛЕДНЯЯ

21. Применение конденсаторов в измерителях параметров элементов электротехнических и электронных устройств

Большое число разнообразных измерительных устройств является электронными. В них, как и в измерительных генераторах синусоидальных колебаний и импульсов, осциллографах, частотомерах, фазометрах, анализаторах спектров и других устройствах, конденсаторы применяются в фильтрах, делителях напряжения, фазовращателях, дискриминаторах, детекторах и т. д. В некоторых из этих приборов конденсаторы являются одним из основных элементов, от которого зависит погрешность измерения.

В пункте 14 уже упоминалось об использовании конденсаторов при высоковольтных измерениях, измерениях радиации и малых постоянных токов (см. пункт 10). В заключительном параграфе книги приведен пример использования электростатических сил между обкладками конденсаторов.

В данном пункте рассмотрим использование конденсаторов в качестве основного элемента устройств для измерения параметров диэлектриков и конденсаторов. Эти устройства применяются как самостоятельные приборы и как составные части автоматических систем контроля параметров конденсаторов при их производстве, контроля изделий с помощью емкостных датчиков (см. пункт 24).

Работа таких устройств основана на использовании в основном двух свойств электрических цепей — резонансных явлений и возможности компенсации напряжений и токов. Первые применяются в измерителях добротности или Q-метрах (упрощенная схема одного из них показана на рис. 54). В них конденсатор переменной емкости C_0 связан механически с ручкой и шка-

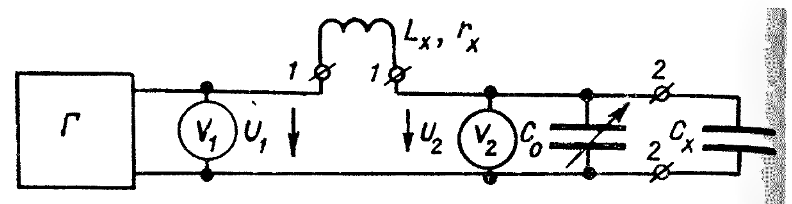


Рис. 54. Схематическое изображение Q-метра:
$Г$ — генератор синусоидального напряжения; V_1, V_2 — вольтметры, L_x — измеряемая катушка индуктивности

лой прибора. Шкала градуируется в единицах индуктивности и емкости.

При фиксированном напряжении U_1 изменением емкости конденсатора C_0 в таком приборе добиваются режима резонанса напряжений, который определяется по максимуму напряжения U_2. Одновременно с измерением индуктивности здесь имеется возможность определить добротность катушки $Q \approx \frac{U_2}{U_1}$. Для этого конденсатор C_0 должен иметь добротность гораздо выше, чем $Q_L = \frac{\omega L_x}{r_x}$.

Конденсатор C_0 в Q-метрах представляет собой магазин емкостей со ступенчатой и плавной регулировкой. Емкость изменяется ступенчато путем переключения набора конденсаторов постоянной емкости, а плавно — с помощью конденсаторов переменной емкости. В таких приборах используются слюдяные и полистирольные конденсаторы, имеющие высокую стабильность емкости и малые потери, а также воздушные конденсаторы переменной емкости. С помощью Q-метров можно также измерять емкость и добротность конденсаторов. Для этого к зажимам *1—1* (см. рис. 54) подключают катушку с известной индуктивностью и добротностью. С помощью генератора $Г$ контур при наибольшей емкости C_0 настраивают в резонанс и определяют добротность Q_1. Затем к зажимам *2—2* подключают измеряемый конденсатор C_x и уменьшением емкости C_0 добиваются резонанса. Емкость измеряемого конденсатора в этом случае будет равна разности значений емкости конденсатора C_0, а добротность $Q_c = \frac{Q_1 \cdot Q_2 (C_{01} - C_{02})}{(Q_1 - Q_2)\, C_{01}}$, где Q_2 — добротность контура при подключенном конденсаторе C_x.

Эти приборы, хотя и просты по устройству, применяются для измерений в основном при средних добротностях катушек и конденсаторов, так как при низких Q резонанс напряжений слабо выражен, а при высоких — возникает большая погрешность измерения из-за неидеальности элементов схемы.

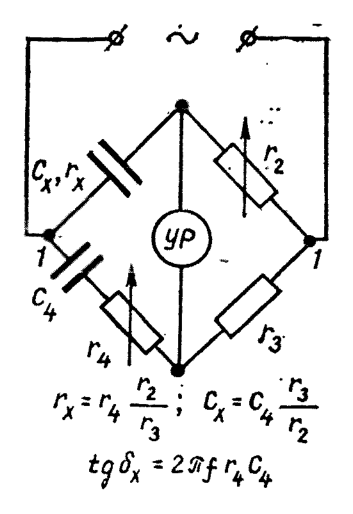


Рис. 55. Мостовая схема для измерения параметров конденсаторов (емкости и тангенса угла потерь)

Другой метод основан на сравнении неизвестного сопротивления с известным. В настоящее время для этого используются мосты переменного тока, последние модели которых представляют приборы с автоматическим уравновешиванием и цифровой индикацией результатов измерений. Упрощенная схема измерительной части одного из вариантов мостов изображена на рис. 55. К точкам *1—1* подводится переменное напряжение питания, в диагональ моста включается нуль-орган — устройство, позволяющее точно зафиксировать равновесное состояние моста. Последнее наступает при определенных соотношениях между параметрами плеч моста. Равновесие достигается путем регулировки значений сопротивлений резисторов r_2 и r_4. Приведенная схема применяется, в частности, в высоковольтных мостах при измерениях тангенса угла потерь, диэлектрической проницаемости, контроля состояния электрической изоляции высоковольтных конструкций и т. д. В таких мостах в качестве C_4 используются специальные высоковольтные воздушные или газонаполненные измерительные конденсаторы с известной емкостью, имеющие малые потери.

В настоящее время известны десятки разновидностей мостовых схем для измерения параметров и характеристик конденсаторов, а также других элементов

электронных и электротехнических устройств. В них в качестве измерительных мер применяются в основном конденсаторы, так как создать стабильный по емкости конденсатор C с высокой добротностью проще, чем катушку индуктивности.

22. Емкостные датчики

Широкая автоматизация процессов в промышленности, на транспорте, в сельском хозяйстве и даже в быту требует контроля и измерения неэлектрических величин электрическими методами.

Чувствительным элементом в системах управления, контроля, регулирования и измерения является датчик. В связи с тем, что большинство таких систем основано на использовании электричества, датчики служат преобразователями измеряемых величин в электрические сигналы.

Широкое применение на практике получили емкостные датчики. Такие достоинства, как незначительные напряженности электрического поля, малое потребление энергии от измеряемого объекта, высокая чувствительность, искробезопасность и другие свойства, обусловили их применение в различных областях, в частности для непрерывного контроля свойств и состояний веществ, разбраковки продукции и т. д.

Применение емкостных датчиков основано на том, что емкость конденсатора может изменяться с изменением одной или нескольких величин, от которых она зависит. Так, для плоского конденсатора емкость $C=\varepsilon_r\varepsilon_0\frac{S}{\delta}$, где ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость материала между обкладками, ε_0 — электрическая постоянная, S — площадь обкладок, δ — расстояние между обкладками.

Для построения емкостных датчиков используют зависимость емкости от расстояния между обкладками (датчики перемещений, давлений, измерители толщины покрытий и т. д.), площади обкладок (счет количества изделий, определение местоположения изделия, измерение малых количеств электричества) и относительной диэлектрической проницаемости ε_r (изме-

рение уровней веществ, влагосодержания, счет изделий, защитная сигнализация, измерение температуры, давления, состава веществ, радиации, напряженности электрического поля, диэлектрических свойств материалов и т. п.).

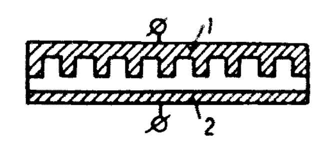
Какой бы параметр емкостного датчика не использовался, в конечном итоге измеряется величина емкости конденсатора, зависящая от этого параметра. Имеются также приборы и устройства измерения неэлектрических величин, в которых изменения емкости приводят к изменению частоты генераторов электрических колебаний.

Устройство емкостных датчиков самое разнообразное. Например, датчик перемещений, принцип работы которого основан на изменении расстояния между обкладками, представляет собой конденсатор, одна из обкладок которого неподвижная, другая — подвижная. Известны конструкции датчиков, где используется упругая деформация электродов (мембранные измерители давления, биметаллические измерители температуры и др.).

В охранной сигнализации, применяемой для ограждения зон, куда человек или животное не должен случайно попадать, емкостные датчики представляют собой провода, подвешенные на изоляторах. К проводам подведено низкое напряжение высокой частоты. При появлении человека или животного в охраняемой зоне изменяется емкость между проводами, что приводит к срабатыванию сигнального устройства. Такие системы применяют для охраны складов горючих и взрывчатых веществ, магазинов, касс, банков, аэродромов и в установках высокого напряжения.

Охранные устройства на основе емкостных датчиков используются также в электронных блоках, предотвращающих защемление людей в дверях кабин лифтов и шахт подъемников. Электроды таких датчиков располагают в кромках дверей. Если в зоне дверного проема при запирании дверей оказывается человек, то возникает изменение емкости между электродами. Релейная электрическая система при этом переключает электропривод дверей на отпирание.

Емкостные датчики применяют на открытых разработках месторождений полезных ископаемых для сис-



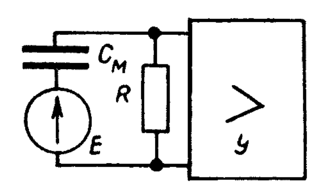


Рис. 56. Схематическое устройство конденсаторного микрофона

тем защиты машин и механизмов от поломки при опасном сближении.

Для определения уровня жидкости или контроля уровня раздела двух жидкостей емкостные датчики обычно представляют собой коаксиальный цилиндрический конденсатор. Между обкладками находится жидкость, уровень которой измеряется. Электроды емкостных датчиков, служащих для выполнения измерений в агрессивных средах, защищаются дополнительным изоляционным покрытием. При изменении, например, уровня раздела жидкостей, имеющих различные относительные диэлектрические проницаемости, изменяется эквивалентная диэлектрическая проницаемость среды между электродами датчика, а следовательно, и емкость датчика.

Примером применения конденсатора с изменяющимся расстоянием между обкладками как датчика звуковых колебаний служит конденсаторный микрофон. Он устроен следующим образом (рис. 56). Элементом, воспринимающим колебания воздуха, является мембрана *2* (упругая полоска металла). Второй электрод микрофона (обкладка воздушного конденсатора) выполнен в виде неподвижной металлической пластинки (*1* на рис. 56), в которой сделаны вырезы для уменьшения сопротивления движения воздуха при перемещении подвижного электрода. Такой микрофон сам по себе не образует электрического сигнала, даже если на него действуют звуковые колебания. Однако если обкладки конденсатора подключить в цепь с источником постоянного напряжения, то в результате изменения емкости конденсатора при перемещении подвижного электрода в ней потечет переменный ток с частотой изменения этой емкости. Переменное напряжение, возникающее в цепи при протекании тока, далее усиливается. Конденсаторные микрофоны обладают хорошими частотными характеристиками. В настоящее время конден-

саторные микрофоны, как правило, изготовляют с электретным источником электрического поля.

Динамический конденсатор используется не только для преобразования звуковых колебаний в электрические, но и для измерения малых значений постоянного напряжения и тока. В таких приборах подвижная обкладка колеблется с постоянной амплитудой и частотой с помощью электромеханического привода, например электромагнитного вибратора. К обкладкам подводится измеряемое постоянное напряжение. В результате периодического изменения емкости динамического конденсатора во входной цепи усилителя, к которому он подключен, протекает слабый переменный ток. Он усиливается до необходимого уровня, а затем измеряется обычными стрелочными приборами.

23. Применение нелинейных конденсаторов

Кроме линейных конденсаторов, емкость которых практически не зависит от напряжения на их обкладках, имеется особая группа нелинейных конденсаторов — варикондов и варикапов. Варикапы — полупроводниковые приборы, не являющиеся в обычном смысле слова конденсаторами, но обладающие некоторыми их свойствами.

Вариконды представляют собой конденсаторы с диэлектриком из сегнетокерамики. Их нелинейность, т. е. зависимость емкости от напряжения на обкладках, обусловлена зависимостью относительной диэлектрической проницаемости ε_r от напряженности электрического поля. Максимальная диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков варикондов (10^4—10^5 единиц) достигается при напряженности поля порядка 100—150 кВ/м. При меньших и больших напряженностях поля диэлектрическая проницаемость, а следовательно, и емкость варикондов уменьшаются. Отношение максимального значения емкости к минимальному для современных варикондов может достигать 8—10 единиц. Абсолютные значения емкостей варикондов, выпускаемых промышленностью, находятся в пределах от десяти пикофарад до единиц микрофарад.

Основные достоинства варикондов следующие: малые габариты при относительно больших значениях

емкости, работоспособность в условиях повышенной влажности, вибраций, ударов, в атмосфере высокого и низкого давления, простота конструкции, большой срок службы. Однако главное их качество — возможность управления их емкостью с помощью электрического напряжения. Для этой цели некоторые типы варикондов имеют две пары обкладок — одна для силового, другая — для управляющего напряжения.

Вместе с тем варикондам присущ такой недостаток, как повышенный тангенс угла диэлектрических потерь, что ограничивает их применение в цепях переменного тока повышенных частот и напряжений.

В пункте 16 уже упоминалось о возможности использования варикондов в стабилизаторах напряжения. На основе варикондов разработаны диэлектрические усилители, отличительной особенностью которых являются малая мощность управления, различные диэлектрические преобразователи, в частности умножители и делители частоты, регуляторы напряжения, генераторы релаксационных колебаний и т. д.

Применение варикондов в искусственных формирующих линиях (см. пункт 4) позволяет получать импульсы напряжения с крутым передним фронтом, поскольку скорость распространения электромагнитной волны зависит от диэлектрической проницаемости, а последняя — от напряжения. Вариконды, как правило, могут быть использованы в устройствах, в которых применяются обычные конденсаторы. Более того, благодаря возможности электрического управления емкостью нелинейных конденсаторов такие устройства приобретают новые полезные свойства.

Одним из первых применений варикондов стало их использование на относительно невысоких частотах в колебательных контурах, где требовалась быстрая перестройка резонансной частоты с помощью электрического напряжения. Это необходимо, например, в перестраиваемых по частоте фильтрах, в генераторах качающейся частоты. Последующие исследования показали перспективность применения варикондов в технике сверхвысоких частот.

Электрические характеристики варикондов подобны магнитным характеристикам катушек индуктивности с ферромагнитным сердечником. Созданы вариконды с

диэлектриками — аналогами магнитомягких, магнитожестких магнитных материалов, а также материалов с прямоугольной петлей гистерезиса. Следовательно, с помощью варикондов могут быть реализованы устройства, основанные на применении нелинейных индуктивностей. На основе нелинейных конденсаторов созданы устройства для преобразования частоты, в том числе и силовые.

Преимуществом конденсаторных преобразователей частоты является емкостный коэффициент мощности, а также жесткая внешняя характеристика при индуктивной нагрузке.

Одна из перспективных областей применения варикондов — силовая полупроводниковая преобразовательная техника. В вентильных преобразователях вариконды могут быть применены для коммутации тиристоров (см. пункт 8), обеспечивая при этом бо́льшие времена для восстановления их запирающих свойств, а также для защиты тиристоров от пиков обратного напряжения и демпфирования высокочастотных колебаний (см. пункт 7).

Вариконды широко используются в различных импульсных устройствах, придавая им качественно новые свойства. Применение варикондов в хронирующих (времязадающих) цепях автоколебательных и заторможенных импульсных схем позволяет плавно регулировать с помощью электрического напряжения длительность импульсов или частоту их повторения. Это открывает широкие возможности использования таких устройств в системах автоматического регулирования и контроля. Примером полезного использования отрицательного свойства варикондов — сильной зависимости их емкости от температуры — служит применение их в качестве датчиков в системах терморегулирования.

Другой вид нелинейных конденсаторов — это варикапы. Они представляют собой полупроводниковые диоды, емкость *p—n*-перехода которых (барьерная емкость) зависит от обратного напряжения на нем. Все полупроводниковые приборы в той или иной мере обладают этим свойством, однако наиболее сильные зависимости емкости от напряжения имеют специальные диоды.

Варикапы — своеобразные конденсаторы (у них отсутствуют диэлектрик и обкладки, их емкость обусловлена слоями зарядов на границе *p*—*n*-перехода), и по способности накапливать заряды они подобны обычным конденсаторам. Емкость варикапов невелика — от единиц до нескольких тысяч пикофарад.

Варикапы, как и вариконды, нашли широкое применение в усилителях, системах регулирования и автоподстройки частоты, модуляторах, фазовращателях, фильтрах, линиях задержки, формирователях импульсов, в качестве управляемого реактивного элемента. Их отличают малые потери энергии, высокая надежность, долговечность, широкий диапазон частот, в котором они могут работать, а также другие положительные свойства. При малых переменных напряжениях варикап, как и вариконд, представляет собой практически линейный конденсатор с емкостью, значение которой регулируется постоянным напряжением смещения.

При относительно большом переменном напряжении проявляются нелинейные свойства варикапов. В таком режиме они применяются в умножителях частоты, в параметрических усилителях и других устройствах. Как и вариконды, варикапы, являясь по электрическим характеристикам в определенном отношении аналогом нелинейных катушек индуктивности, широко используются в устройствах автоматики.

Будучи полупроводниковым прибором, варикап обладает всеми достоинствами и недостатками таких приборов. Достоинства: возможность создания приборов в микроминиатюрном виде, малая масса, габариты, способность выдерживать удары, большие ускорения и вибрации. Недостатки: зависимость параметров от температуры, хотя эта зависимость и меньше, чем у варикондов.

24. Конденсаторы — рабочие органы устройств

Применение конденсаторов для диэлектрического нагрева — один из примеров полезного использования отрицательного свойства, проявляющегося в электрических конденсаторах при выполнении функций, рассмотренных в предыдущих пунктах. Это свойство заключается в частичном преобразовании элект-

рической энергии в тепловую, рассеиваемую ими в окружающее пространство.

В большинстве видов конденсаторов мощность тепловыделения сравнительно невелика — от 0,1 до 10 Вт на 1 кВ·А реактивной мощности в зависимости от конструкции конденсатора (в основном — вида диэлектрика), частоты и формы напряжения на нем. Так, при синусоидальном напряжении мощность потерь энергии рассчитывается по формуле $P = U^2 2\pi f C \operatorname{tg}\delta$, где U — действующее значение напряжения, f — частота напряжения, C, $\operatorname{tg}\delta$ — емкость и тангенс угла потерь конденсатора. Например, если $U = 10^3$ В, $f = 10^3$ Гц, $C = 10^{-6}$ Ф и $\operatorname{tg}\delta = 10^{-3}$, мощность тепловыделения составит 1 Вт. Несмотря на то, что приведенные активные мощности конденсаторов относительно малы, тепло, образующееся в конденсаторах, при переменном напряжении может вызывать заметный их нагрев

Способность диэлектрика, помещенного в переменное электрическое поле, преобразовывать часть энергии этого поля в тепло используется в установках диэлектрического нагрева материалов. Цель установок — эффективнее преобразовывать электрическую энергию в тепловую. Для этого материалы помещают между металлическими пластинами — обкладками рабочего конденсатора, к которым подводится переменное напряжение. Емкость такого конденсатора мала (порядка сотен и тысяч пикофарад), поскольку расстояние между обкладками довольно значительно (десятки и сотни миллиметров)

Для получения достаточно большой мощности тепловыделения согласно приведенной выше формуле к обкладкам рабочего конденсатора установок диэлектрического нагрева необходимо подвести либо очень высокое напряжение низкой частоты, либо умеренное по значению напряжение высокой частоты. Последний путь единственно возможен, так как при применении очень высокого напряжения между обкладками рабочего конденсатора возникает электрический пробой и, кроме того, усложняется обслуживание установки В связи с этим рабочие конденсаторы установок диэлектрического нагрева питаются от ламповых генераторов высокой и сверхвысокой частоты (см. рис. 22). Для различных установок частота питающего напряжения

составляет от единиц до сотен миллионов герц. В последнее время для диэлектрического нагрева начали использовать магнетронные генераторы с частотами в миллиарды герц.

Мощности установок составляют от долей до десятков киловатт. Диэлектрический нагрев обеспечивает тепловыделение по всему объему материала, т. е. более быстрый и более равномерный его прогрев. Вместе с тем этот вид нагрева относительно дорог. Например, при сушке диэлектрических материалов расход энергии составляет от одного до пяти киловатт-часов на 1 кг испаренной влаги. Несмотря на это, благодаря ускорению технологического цикла, повышению качества продукции, а также улучшению условий труда диэлектрический нагрев уже в сороковые годы XX-го века получил быстрое развитие. В настоящее время он широко используется для сушки различных материалов, их нагрева, для прессования, склеивания, сварки (пластмасс), вулканизации каучука, варки стекла.

В последнее время появились сверхвысокочастотные установки для приготовления пищи, использующие бесконтактный нагрев продуктов в электрическом поле. В этих установках рабочий конденсатор уже не является четко выделенным элементом устройства, так как на сверхвысоких частотах передача энергии и ее концентрация осуществляются системами с распределенными параметрами — волноводами и объемными резонаторами. Пища приготавливается на таких установках в минимальные сроки и имеет высокое качество, хотя и несколько непривычный вид: например, на хлебе отсутствует корка.

Диэлектрический нагрев используется не только в технологических целях, но и в медицине. Поле рабочего конденсатора, имеющего в УВЧ-установках для лечения малую площадь обкладок, воздействует локально на участок тела, обеспечивая прогрев его глубинных слоев.

Другим примером использования уже не тепла, а механических сил, возникающих между обкладками конденсатора при подаче на них электрического напряжения, являются электростатические измерительные приборы (вольтметры, электрометры и т. д.). В таких приборах одна обкладка рабочего конденсатора

неподвижная, а другая — подвижная. При подаче напряжения на обкладки появляющиеся на них электрические заряды обусловливают кулоновские силы взаимодействия и поворот подвижной системы на упругих нитях. Имеются также другие конструкции электростатических приборов, в которых за счет механических сил происходит преобразование измеряемого напряжения в угол поворота или линейное перемещение подвижной части.

Главным преимуществом приборов электростатического типа являются их большое входное сопротивление, достигающее 10^{12}—10^{14} Ом, и малые емкости (порядка единиц пикофарад), благодаря чему они практически не потребляют тока от объекта, что важно при измерениях в высокоомных и маломощных цепях.

* * *

Итак, конденсатор — один из наиболее широко применяемых элементов электронных и электротехнических устройств. Условия его эксплуатации в таких устройствах разнообразны. В основном конденсаторы используются в качестве накопителей электрической энергии и частотно-зависимых реактивных сопротивлений. Конструкции, параметры и характеристики конденсаторов различны. Они постоянно совершенствуются, создаются новые их типы и виды, обладающие большей энергоемкостью и способные работать в более тяжелых режимах.

Одна из актуальнейших задач исследователей — детальное изучение всех параметров, характеристик конденсаторов и разработка рекомендаций по наиболее эффективному их применению. Другая задача, разрешение которой имеет также большое практическое значение,— это разработка методов прогнозирования эксплуатационной надежности конденсаторов.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава IV. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНАЯ, НО НЕ ПОСЛЕДНЯЯ